

潮汐沉积体系中的古潮汐信号

——以豫西元古界鲁山剖面为例

吴和源

(中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083)

摘要:作为古潮汐研究窗口的现代潮汐沉积体系,其研究的不断深入为古地层序列中潮汐沉积环境的重建提供了重要的理论基础与识别依据。潮汐体系的不同分类与潮坪环境的异样分带,为多样的潮汐信号提供了独特的沉积环境;现代潮汐体系中的微生物研究不断扩展生物成因古潮汐信号的涵盖范畴,物理成因潮汐信号的丰硕成果为古沉积环境重建奠定了坚实基础。结合潮汐沉积体系中古潮汐信号的新进展,分析了豫西元古界鲁山剖面的沉积特征,旨在为区域古环境重建提供借鉴意义。

关键词:潮汐沉积体系;古潮汐信号;豫西;元古界

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

潮汐具有形成能够剥蚀、搬运和堆积沉积物水流的能力,在现代环境中广泛发育,并穿插于大部分的地球历史,其形成机制和沉积过程响应一直吸引着众多领域的科研人员。人类对潮汐的研究已有 50 多年的历史。早期对荷兰 wadden 海岸^[1-3]潮汐的探索成为潮汐研究的划时代标志, Klein^[4]对 Fundy 海湾的详细工作为北美提供了最早的潮汐研究记录,后续 Evans^[5]在英格兰潮汐海岸和 Bajard^[6]对法国潮汐海岸的详细工作为古沉积序列研究提供了现实类比。针对巴哈马群岛安德罗斯岛(Andros Island)^[7]以及波斯湾^[8]的研究开启了碳酸盐岩地区潮汐研究的序幕,同时也将潮坪环境研究推向热点。

20 世纪 60—80 年代,现代潮汐研究不断走向成熟,古地层序列中的潮汐探索却进展缓慢,其主要原因是:① Irwin^[9]提出古陆缘海由于潮汐摩擦引起的能量降低,多数陆缘海为非潮汐环境;

② 潮汐识别标志的缺乏。然而,20 世纪 80 年代 Visser^[10]对水下沙丘交错层中“潮汐束”(tidal bundles)的认识为潮汐沉积提供了第 1 个明确标志,成为潮汐研究的重要里程碑,同时带来了在区域上对古潮汐沉积识别的热潮。70 年代以来,针对潮汐行为提出了大量的理论以及定量模型,以动态潮汐论(dynamic tidal theory)^[11-14]和均衡潮汐论(equilibrium tidal theory)^[15-18]为代表,并不断引入潮汐动力和潮汐过程方面的新见解,将潮汐环境研究的焦点从潮坪向更广阔的背景转移。随着现代潮汐研究的深入,作为古潮汐沉积环境重建证据的潮汐作用标志,其重要性得到地质学家一致认可,并提出一些新的古潮汐信号。结合元古界鲁山剖面,分析古潮汐信号的形成机制与表现形式,为地层序列中古环境重建提供线索。

1 潮汐沉积体系与潮汐信号

受控于潮汐机制和海洋循环的海岸线,沉积物聚集主要受潮汐影响或潮汐主导的沉积体系称为“潮汐沉积体系”,对其地质记录中沉积物和相

收稿日期:2013-10-14

基金项目:国家自然科学基金(40472065)

作者简介:吴和源(1986—),男,在读博士,主要从事沉积学方面的研究工作。E-mail: tom198672@126.com

的研究主要以现代潮汐动力的解释作为窗口。现代潮汐研究表明,不同海岸区域潮汐沉积体系变化较大,所形成的潮汐信号也不尽相同,且海岸潮汐沉积体系的类型与地层序列中的古潮汐信号的保存有着重要的联系。在古海洋背景中,参照现代潮汐沉积体系中陆缘海洋序列沉积物的研究,依据潮差的大小将潮汐环境划分为大、中、小型潮汐体系^[19],为不同潮汐体系中潮汐信号的对比研究提供路径。

(1)巨型和大型潮汐体系 在巨型(潮差 >8 m)和大型(潮差 >4 m)潮汐体系中,潮汐水流占主导,如河口湾和潮汐主导的三角洲^[20]。其中河口湾是最常见的大型潮汐沉积体系,如布里斯托尔海峡等^[21]。河流携带的沉积物在河口湾处向浅海潮下和潮间搬运聚集,形成大型的复合沙坝和复合沙丘。对现代海岸统计得出,三分之一的现代海岸为大型潮汐体系^[22],多数具河口湾背景的海岸为巨型潮汐体系^[23-25],这些统计数据在古潮汐研究方面具有重要意义。

(2)中型潮汐体系 指潮差在 $2\sim 4$ m的海岸区域,该区域潮汐水流作用明显,同时还伴随显著的波浪水流影响。障壁海滩、潮汐三角洲和河口湾常发育中型潮汐沉积体系^[19,26-28]。在障壁海滩背景中,由于涨落潮的作用,在砂质障壁的海水进出口的两侧可形成涨潮型三角洲和退潮型三角洲,其分布范围可达上千米^[19,26,29]。在中型潮汐体系中,潮汐与其他水动力过程相互影响,形成潮汐沙坝、沙脊、沙席、复合沙丘所组成的复杂沉积组合特征。

(3)小型潮汐体系 以波浪作用为主导(潮差 <2 m),潮汐作为其他次级过程的产物^[30],除特殊的海岸背景,比如狭窄的海湾或海峡^[31,32],由于潮汐旋回常被随机的或非潮汐事件沉积所掩盖,比如波浪以及其他因素水流造成的周期侵蚀,小型潮汐信号在古地层序列中的保存较为不易。

然而不论在何种潮汐体系中,潮汐都常以潮上带、潮间带和潮下带的形式出现^[33],且由于潮差和海岸类型的变化,不同的海岸区潮汐体系各带的分布面积变化较大^[29,34-36],导致地层序列中所保存的沉积构造以及潮汐信号类型呈现出多样的变化性。

2 多样的古潮汐信号

受潮汐水动力作用的沉积物以其独特的沉积样式产出,记录影响海岸区域的主要分潮信息,在现代和古地层序列中以潮汐信号的形式保存。这些信号以旋回性沉积为主导,代表了短期的半日潮或多年的长期旋回,通过不同砂泥比变化,形成毫米到米级厚度的岩性互层沉积。从潮间和潮下,到甚至区域深度达百米变化的潮汐序列沉积环境,古潮汐信号的保存程度大相径庭。

Klein 对北美潮汐沉积的详细研究,展示了地层记录中潮汐过程与不同沉积构造之间的联系,并提出“潮积岩”的概念^[37-39],其薄层、泥质互层(透镜状、波状或压扁层理)到砂质单向、双向或束状交错层理等特征,被应用到潮汐影响的沉积物和沉积构造中,作为野外地层序列中潮汐沉积环境鉴别的主要标志^[40,41]。但由于潮汐环境的不同,潮汐序列中保存的生物、化学、物理信号的区别,以及由于沉积环境能量条件不足、无沉积物或波浪影响改造等多种因素的共同作用,潮汐序列中可能缺乏应有的潮汐信号,导致对潮积岩的错误识别。因此,对重要潮汐信号的认识,是野外潮积岩鉴定以及古环境重建的基础。

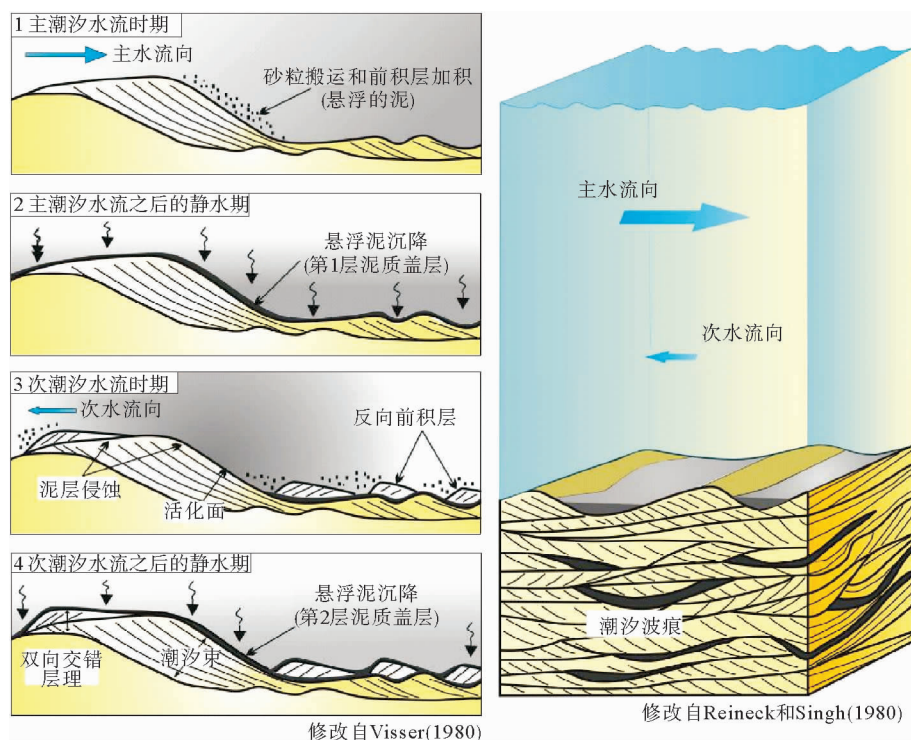
2.1 生物成因古潮汐信号

从潮间带到潮下带,底栖微生物占据了多数潮汐影响的沉积环境,且以微生物膜^[42]或微生物席的形式与沉积物共同作用形成“微生物诱发的沉积构造”,在地层面上留下丰富的地质记录。以大量的现代微生物席研究以及古沉积构造类比分析为基础,地质学家不仅解释了“微生物诱发的沉积构造”在寒武纪之后急剧下降的原因^[43-45],还对其沉积构造类型^[43,46-48]以及对应的沉积环境^[49,50]作了较细的总结。认为位于潮坪到潮下环境中的微生物席与春潮有着重要联系^[51],其沉积构造主要发育在潮汐作用环境,根据海岸类型的不同表现形式发生变化,在碎屑岩表现为微生物诱发的沉积构造 MISS(microbial induced sedimentary structure)^[46,52,53];在碳酸盐岩中最为典型的产物为叠层石^[54,55]。两者在前寒武纪的普遍性和显生宙的局限分布性,对于研究地球表层环境演化具有重要意义。

除叠层石和 MISS 之外,生物成因的古潮汐信号还包括代表潮间坪上部盐沼^[56]或潮上坪红树林环境的泥炭^[57]、河口湾软体动物介壳层^[58]以及内底栖生物形成的洞穴构造。但只有原地沉积的泥炭和软体动物壳层才能作为潮积岩,且形成于潮间和潮下环境的内底栖生物洞穴构造,本身没有明显的潮汐特征,强烈的生物扰动导致无层理或层理的不完全保存,因此,应用于古潮汐环境识别时需谨慎。

2.2 物理成因古潮汐信号

潮汐水流双向性、水位频繁变化性以及潮流期和平潮期交替变换性是潮汐作用的主要特征^[59],也是识别潮汐沉积环境的3种途径。在潮汐沉积环境中,底形在其特征水流的控制下迁移,搬运聚集沉积物(图1),形成特殊的层面以及三维立体构造,即为物理成因的古潮汐信号,是潮积岩的重要类型。



注:在主水流时期,潮汐水流搬运粗颗粒沉积物形成统一方向倾斜前积纹层,加积形成交错层理;随之的静水期沉积细粒悬浮泥质沉积物,当在反方向次要水流作用时,沉积反向前积层形成双向交错层理,伴随的剥蚀作用刻画出明显的活化面构造,迁移底形层面上形成潮汐波痕

图1 完整潮汐旋回中底形迁移示意图(据文献[18]修改)

Fig. 1 Schematic diagram of migrating bedforms during a complete tidal cycle (modified from reference [18])

2.2.1 潮汐韵律岩

潮汐主导体系中重复的潮汐信号以薄层产出,被称为“韵律岩”^[60,61],有节奏变化的厚度与旋回性堆积的砂泥层是其重要特征^[35,62-66]。“韵律岩”一词被用来暗示垂向上增生的潮汐相,是潮间到潮下环境中涨潮和退潮期间形成的三维立体的沉积序列。然而当沉积序列具有较强的韵律性时,韵律岩一词也可以应用到一些横向增生的沉积^[40]。但应注意的是,薄层的韵律层不一定都形

成于潮汐过程。

2.2.2 交错层理

在潮汐环境中,底形在涨潮和退潮期间不断迁移,形成记录潮汐信号的特殊沉积构造,包括双向或鱼骨状交错层理、活化面(再作用面)、潮汐束(图1)。

涨潮和退潮水流方向通常相反或至少相差90°(图1),底形在迁移过程中交错层方向随水流的方向发生改变。随着沉积物的增加,最终形成相反方向倾斜叠加的交错层。当涨潮和退潮期间,沉积物

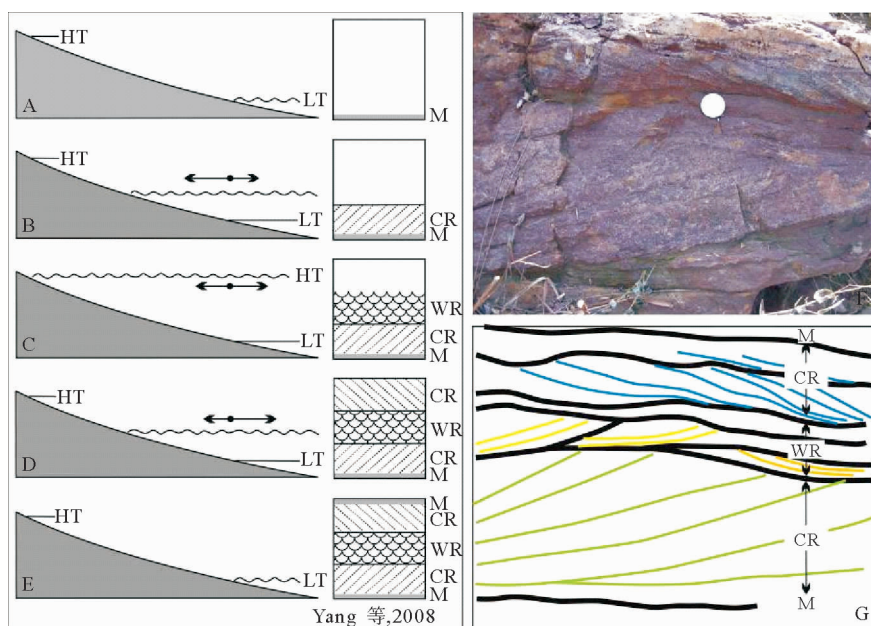
供给平衡时,即形成鱼骨状交错层理,但通常潮汐水流在涨潮和退潮条件下常显示显著的不对称性,因此,鱼骨状交错层理保存较少。不仅如此,在底形迁移过程中,不同时间段潮汐水流涨潮和退潮速度及能量的不一致,同一位置潮汐旋回可能仅有一个主导水流方向,另一个为从属关系的次要水流。主导水流移动底形,形成交错层理,次要水流向相反方向移动,剥蚀底形上部沉积物,形成侵蚀的波状面。当下一旋回发生时,底形在主导水流作用下再次迁移沉积,伴随潮汐旋回的不断重复,在连续的迁移底形之间形成波状起伏的接触面,即活化面(reactivation surface)^[67](图 1)。活化面在古地层序列中较为显著,是潮下环境的典型代表,但当应用其识别潮汐环境时,需要结合其他的沉积构造,因为在单向水流作用的环境,如溪流等,也可以形成显著的活化面^[68,69]。

2.2.3 波浪型潮汐束

现存的沉积学模型将海岸沉积环境划分为 2

种类型,波浪主导或潮汐主导^[70],然而现代海岸环境研究^[71,72]表明,波浪主导的潮坪在两者之间的过程在沉积学谱系中占据了重要位置,并提出了“波浪型潮汐束”(wave-generated tidal bundle)的概念,为滨面和波浪主导潮坪环境之间的识别提供了可能。典型的潮汐束(tidal bundle)是春一小潮旋回时期,在潮坪环境中单独潮汐旋回形成的砂泥对偶层,具特殊的交错层理,由于底形迁移中潮汐水流速度的变化形成不同厚度的束状体(图 1、图 2g)。作为一种交错层理构造的潮积岩,是潮坪环境的重要鉴别标志。然而,波浪型潮汐束^[73]形成于波浪和潮汐水流混合机制的间断变化,并非是潮汐水流单独改变所致,与典型潮汐束的岩性互层存在重大区别,是交错层理占主导的沉积相。

波浪型潮汐束是波浪主导的潮坪环境中单个潮汐旋回波浪和反向潮汐水流共同作用的结果,具 3 个特征的波段(rippled intervals)(图 2):①底波段(basal interval),由向陆方向倾斜的波状



注:箭头指示潮汐水流和波浪共同控制的沉积物向陆或向海搬运的相对强度。HT:高潮;LT:低潮;M:泥质盖层;CR:混合水流波纹;WR:浪成波纹。A:低潮时期,在潮汐水流停滞期沉积薄层泥质盖层;B:涨潮时期,潮坪受涨潮流主导,叠加波浪作用,形成向陆方向倾斜的波纹;C:高潮时期,波浪在潮坪沉积中占主导,形成对称波痕组成的中部波段;D:退潮时期,混合水流机制以向海方向的退潮流为主,形成向海方向倾斜的波纹;E:低潮时期,潮汐水流停滞期沉积第 2 层薄层泥质盖层;F、G:波浪型潮汐束实例

图 2 波浪主导潮坪环境中完整潮汐旋回的事件沉积与百草坪组底部波浪型潮汐束实例(据文献[73]修改)

Fig. 2 Schematic diagram showing the series of sedimentary events and an example of wave-generated tidal bundle from Baicaoping Formation (modified from reference [73])

交错层组成,形成于涨潮时期的混合水流机制;②中波段(middle interval),高潮时期水流以震荡运动为主,形成对称顶部建造的浪成波痕交错层理;③顶波段(top interval),由向海方向倾斜的波状交错层组成,形成于退潮时期的混合水流机制。因此,波浪型潮汐束暗示其沉积环境为弱潮汐水流和高能量波浪共同控制,可预测古沉积序列中开阔型海岸潮坪环境(如波浪主导的潮坪环境)的出现。

2.2.4 潮汐沙丘、潮汐复合沙丘和沙席

强烈潮汐水流作用下,底形伴随主水流迁移富集,形成不同尺度的几何形态,从潮汐沙丘到潮汐复合沙丘以及二者叠加形成的潮汐沙席,潮积岩呈现出不同的表现形式。

泥岩层以及泥质碎片在地层序列中常被作为是潮汐环境的重要识别标志,但在富砂的海洋边缘和开阔海洋背景,厚层和次序叠加的交错层理砂岩才是最主要的潮汐信号。强烈的潮汐水流作用,形成潮汐沙丘占主导的潮汐沉积序列^[74]。潮汐沙丘和复合沙丘向前加积,亚平行于主潮汐水流方向,在海岸和滨海陆架环境,平行于海岸延伸,在一些区域叠加形成潮汐沙席^[75,76]。保存的交错层理砂岩也随底形几何形态的不同而转变。从水深10~15 m的复合沙丘到近海水深10 m左右的潮汐沙坝和沙脊,交错层理从高角度向低角度的演变,以及板状、槽状向波状的变化,共同见证潮汐能量以及沉积环境随时空的转变。

以上介绍的仅为常见的物理成因与生物成因潮汐信号,在不同的潮汐沉积体系类型中,随其特征水流能量及空间环境的变化,各种潮汐信号所呈现的潮积岩类型丰富多样,共同作为潮汐沉积环境的识别依据,在豫西元古界云梦山组与百草坪组的强迫型海退潮坪沉积环境的识别中发挥了重要作用。

3 豫西元古界鲁山下汤剖面中的古潮汐信号及其指示意义

豫西地区元古界汝阳群地层是一个主要受潮汐和风暴影响的滨岸和内陆沉积序列,不整合于熊耳群火山岩系之上,由云梦山组、百草坪组、北大尖组构成^[77-79],为华北板块南缘最早的区域沉

积盖层。

云梦山组为一套结构成熟度和成分成熟度相对较低的中粗粒砂岩地层,而百草坪组主要由紫红色页岩以及夹薄层石英砂岩的粉砂质页岩组成。云梦山组和百草坪组具有红层性质的干旱泥页岩地层一起组成了4个三级层序(图3)。云梦山组本身与百草坪组底部的厚层干旱紫红色泥页岩地层一起组成3个三级层序,这些三级层序的基本特征是:层序的海侵体系域和早期高水位体系域发育高能潮下坪中粗粒含长石砂岩,与潮间坪薄层泥质砂岩或潮上坪薄层砂质泥岩一起构成若干厚基底类潮汐动力型碎屑岩米级旋回。在层序的晚期高水位体系域中则主要发育由潮间坪泥质砂岩与潮上坪中薄层砂质泥岩组成的薄基底类潮汐动力型米级旋回。百草坪组的大部分组成第4个三级层序,其下部的海侵体系域发育较多较厚的潮道滞留沉积的粗砂岩透镜体和透镜层,代表了潮间坪至潮上坪环境的沉积;上部则发育厚层块状的干旱砂质泥页岩。

鲁山下汤剖面地层序列中的4个三级层序都是形成在海平面上升变化所造成的海侵—海退旋回中的沉积序列,代表了一个成因相关联的沉积趋势。并且,从云梦山组到百草坪组,本身又组成一个更大级别的从潮下砂岩到潮上坪干旱泥页岩的二级层序,该二级层序记录了豫西地区强烈的海侵到显著的强迫型海退过程沉积,并留下大量的古潮汐信号,为古环境重建提供重要依据。

物理成因的古潮汐信号作为主要的潮汐作用标志贯穿了该沉积序列的始终。其中潮汐韵律岩作为主要的物理成因古潮汐信号在沉积序列中分布广泛。随着沉积环境的变化,每一个三级层序中潮间坪砂泥互层的潮汐韵律层向潮上坪环境逐渐演变为透镜状层理(图3B、图4c),而向潮下高能环境则形成特有的脉状层理(图3E、图4d),以及显著的冲刷面(图4g),在垂向上形成一个能量梯度的变化格架。在二级层序的海侵和强迫型海退过程中,潮汐韵律岩整体呈现出相似的变化格局,云梦山组作为二级层序的海侵和早期高水位体系域,主要为中厚层细粒石英砂岩与紫红色薄层砂质泥页岩互层构成潮汐韵律岩,而作为二级层序的强迫型海退过程,百草坪组则以薄层细粒石英砂岩与紫红色砂质泥页岩互层构成韵律岩;

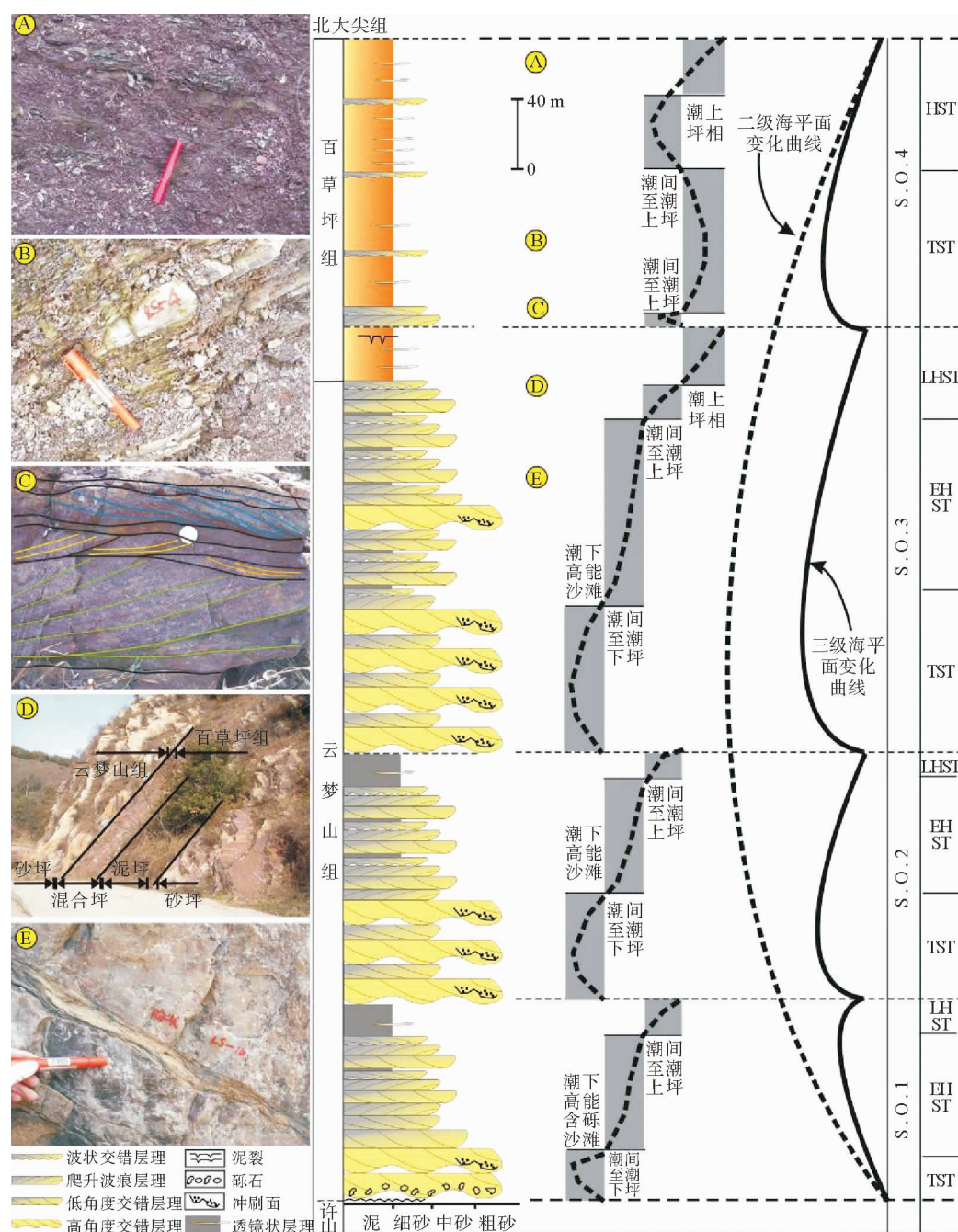


图 3 鲁山下汤剖面云梦山组与百草坪组层序地层格架

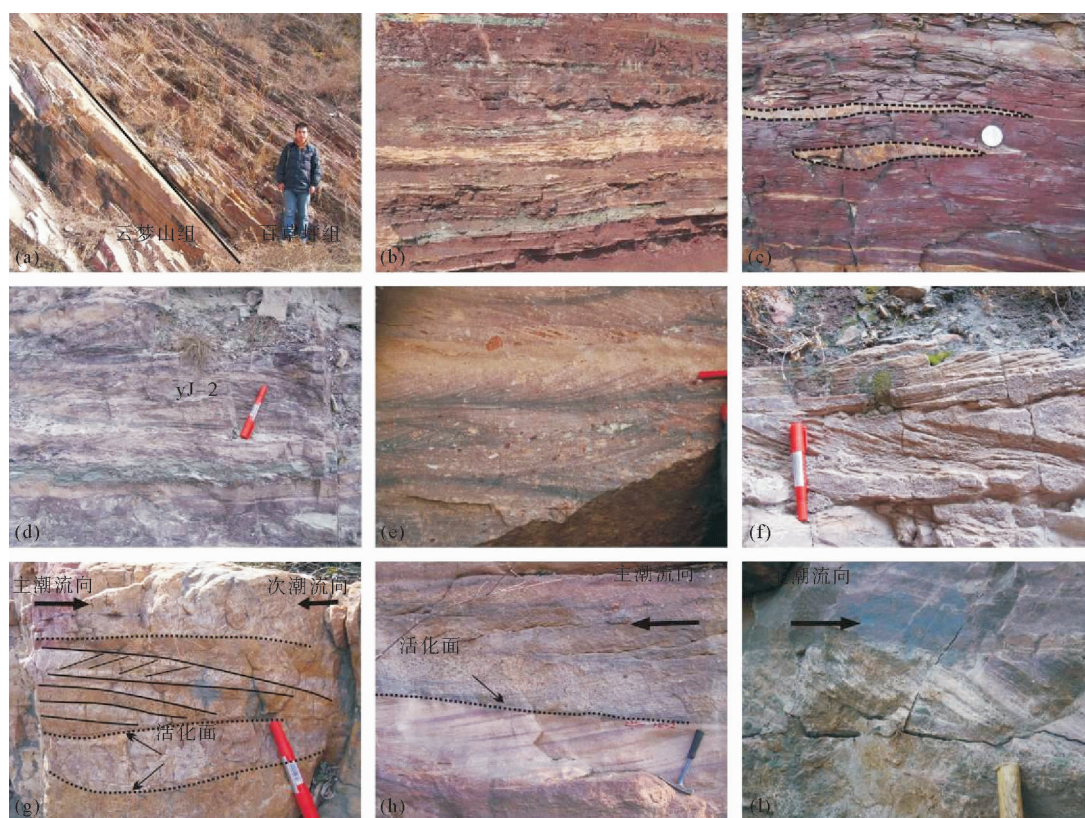
Fig. 3 Diagram showing the sequence-stratigraphic divisions for Yunmengshan and Baicaoping formations at the Xiatang section of Lushan area

向上减少的冲刷面、高角度交错层理以及向上激增的波状层理和透镜状层理,共同见证着二级层序中潮汐能量的时刻变化。

百草坪组上部的第 4 个三级层序作为二级层序强迫型海退过程沉积,底部记录了特殊的物理成因古潮汐信号——“波浪型潮汐束”。波浪型潮

汐束作为一种特殊的沉积环境指示标志,在百草坪组中保存较为少见,但其特征性的 3 种波状间断(图 2F、2G,图 3C),为开阔型海岸潮坪背景的沉积解释提供了有力的证据。

除显著的物理成因古潮汐信号外,云梦山组和百草坪组记录了大量的作为生物成因古潮汐信



a 云梦山组与百草坪组中的分界,云梦山组顶部为中厚层中粗粒砂岩与紫红色泥页岩互层构成潮汐韵律岩;b 百草坪组潮上坪薄层细粒砂岩与紫红色砂质泥页岩互层构成的潮汐韵律岩;c 百草坪组中部透镜状层理;d 百草坪组底部压扁层理;e 云梦山组中部的潮汐束;f 北大尖组底部鱼骨状交错层理;g—i 云梦山组底部单向交错层理及活化面构造

图4 鲁山下汤剖面中的物理成因古潮汐信号

Fig. 4 Physical palaeotidal signature at Xiatang section in Lushan area

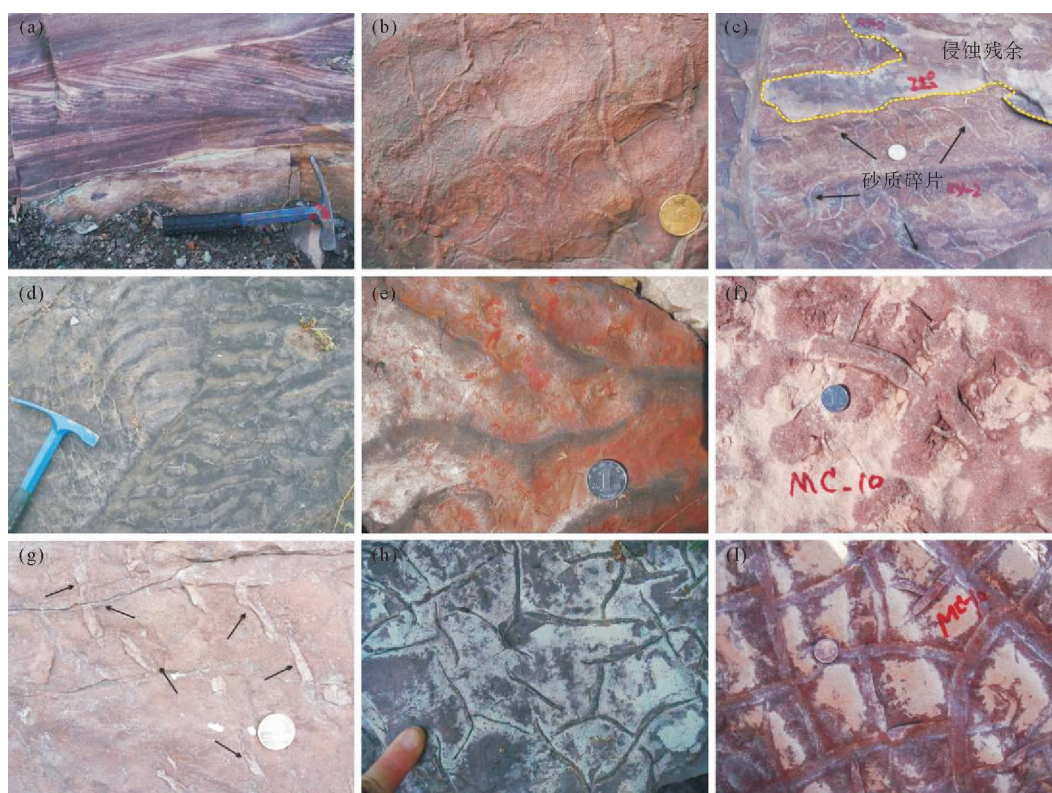
号的“微生物诱发的沉积构造(MISS)”(图5)。国内学者对其做了大量研究^[48-50,79],并且对其成因机制和沉积环境类型做了系统总结。鲁山下汤剖面中其特征的MISS,在地层序列中表现出明显的分带现象。潮下带—潮间带下部多发育微生物席碎片(图5b、5c),潮间带上部以多向波痕和微生物席保护波痕为主(图5d、5e),而潮上带则主要为微生物席脱水形成的砂质裂缝(图5f、5i)。其分带现象在一定程度上直接阐释了沉积环境的类型以及微生物席的成因类型,是地层序列中重要的生物成因古潮汐作用标志。

4 讨论和结语

潮汐作为一种重要的地质营力,广泛作用于现代环境和古沉积序列,在复杂的地质记录中

留下丰富的印记。在特征水流作用下,形成典型的岩性互层,通常以潮汐层或潮汐束等物理成因潮汐信号的形式出现。作为潮汐作用的主要证据,潮汐信号不仅反映了古沉积环境的重要特征,而且展示了其类型多样性的特点。但应该清楚的认识到的,由于后期波浪或生物作用,地层中所保留的潮汐信号,仅代表地质历史潮汐环境中的很小部分,将其应用于沉积环境识别时需谨慎。

地质学家与天文学家在现代潮汐研究的基础上提出大量的新理论和见解解释古地层序列中的潮汐现象,提升了古潮汐信号研究的重要性。物理成因与生物成因的古潮汐信号作为潮汐作用标志中2大主要类型,随着现代潮汐海岸研究的不断深入,古潮汐信号范畴不断扩大,为古环境的重建提供了更多的对比标志。



a 紫红色板状交错层理砂岩,层面上发育大量 MISS;b 潮下带微生物席碎片;c 层面上发育厚层微生物席形成的侵蚀残余;d 潮间带多向波痕;e 潮间带上部微生物席保护波痕;f 潮上带网格状砂质裂缝;g 潮上带纺锤状砂质裂缝;h 潮上带鸟足状砂质裂缝;i 潮上带网格状砂质裂缝

图 5 鲁山下汤剖面中的生物成因古潮汐信号

Fig. 5 Biogenic palaeotidal signature at Xiatang section in Lushan area

鲁山元古界汝阳群地层中丰富古潮汐信号分析表明,豫西地区汝阳群沉积期可能为开阔海岸潮坪沉积环境,但由于地质记录的复杂性与不完整性,欲获得最佳的古沉积环境重建,综合其他地质数据资料尤为重要。

参考文献:

- [1] Van Straaten L M J U. Composition and structure of recent marine sediments in the Netherlands[J]. Leidse Geol Mededel, 1954, 19:1-110.
- [2] Postman H. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1961, 1(1/2):148-190.
- [3] Reineck H E. Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee[J]. Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft, 1963, 505:1-138.
- [4] Klein G D. Bay of Fundy intertidal zone sediments[J]. J Sediment Petrol, 1963, 33:884-854.
- [5] Evans G. Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash [J]. J Geol Soc Lond, 1965, 121:209-245.
- [6] Bajard J. Figure et structures sédimentaires dans la partie orientale de la baie de Mont Saint-Michel[J]. Rev Geog Phys Geol Dyn, 1966, 8:39-112.
- [7] Shinn E A, Lloyd R M, Ginsburg R N. Anatomy of a modern carbonate tidal flat, Andros Island, Bahamas[J]. J Sediment Petrol. 1969, 39:112-123.
- [8] Evans G, Schmidt V, Bush P, et al. Stratigraphy and geologic history of the Sabkha, Persian Gulf[J]. Sedimentology, 1969, 12:145-159.
- [9] Irwin M L. General theory of epeiric clear water sedimentation[J]. Bull Am Assoc Petrol Geol, 1965, 49:445-459.
- [10] Visser M J. Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note[J]. Geology, 1980, 8:543-546.
- [11] Pugh D T. Tides, Surges and Mean Sea-Level[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1987: 472.
- [12] Williams G E. Late Precambrian tidal rhythmites in South Australia and the history of the Earth's rotation[J]. J Ge-

- ol Soc Lond, 1989, 146:97-111.
- [13] Kvale E P, Johnson H W, Sonnett C P, et al. Calculating lunar retreat ratio using tidal rhythmites[J]. *J Sediments Res*, 1999, 69:1 154-1 168.
- [14] Kvale E P. The origin of neap-spring tidal cycles[J]. *Marine Geology*, 2006, 235:5-18.
- [15] MacMillan D H. *Tides*[M]. New York: Elsevier, 1966: 240.
- [16] Open University Course Team. *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*[M]. second ed. Butterworth-Heinemann, Oxford: Open University, 1999:227.
- [17] Duxbury A B, Duxbury A C, Sverdrup K A. *Fundamentals of Oceanography*[M]. fourth ed. Boston: McGraw Hill, 2002: 344 p.
- [18] Longhitano S G, Mellere D, Steel R J, et al. Tidal depositional systems in the rock record: A review and new insights[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 279:2-22.
- [19] Hayes M O. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime[C]//Latherman S P. *Barrier Island from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. New York: Academic Press, 1979: 1-71.
- [20] Prandle D. *Estuaries: Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*[M]. New York: Cambridge University Press, 2009: 236.
- [21] Parker W R, Kirby R. Sources and transport patterns of sediment in the inner Bristol Channel and Severn Estuary [C]// *Severn Barrage*. London: Thomas Telford, 1982: 181-194.
- [22] Davies J L. A morphogenetic approach to world shorelines [J]. *Zeitschrift für Geomorphology*, 1964, 8:27-42.
- [23] Masselink G, Turner I. The effects of tides on beach morphodynamics[C]// Short A D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Canada: John Wiley & Sons Toronto, 1999: 204-229.
- [24] Levoy F, Monfort O, Larssonneur C. Hydrodynamic variability on megatidal beaches, Normandy, France[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21:563-586.
- [25] Dashtgard S E, Gingras M K, MacEachern J A. Tidally modulated shorefaces[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79:793-807.
- [26] Boothroyd J C, Friedrich N E, McGinn S R. Geology of microtidal coastal lagoons, Rhode Island[J]. *Marine Geology*, 1985, 63: 35-76.
- [27] Ashley G M, Zeff M L. Tidal channel classification for a low-mesotidal salt marsh[J]. *Marine Geology*, 1988, 82: 17-32.
- [28] Nichols M M. Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons[J]. *Marine Geology*, 1989, 88: 201-219.
- [29] Davis R, Fitzgerald D M. *Beaches and Coasts*[M]. New York: Wiley-Blackwell, 2004: 419.
- [30] Dean R G, Dalrymple R A. *Coastal processes with engineering applications*[M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 475.
- [31] Longhitano S G, Nemec W. Statistical analysis of bed-thickness variation in a Tortonian succession of biocalcarenitic tidal dunes, Amantea Basin, Calabria, southern Italy [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 179: 195-224.
- [32] Longhitano S G. The record of tidal cycles in mixed siliciblastic deposits: examples from small Plio-Pleistocene peripheral basins of the microtidal central Mediterranean Sea[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(3): 691-719.
- [33] Bridge J S, Demicco R V. *Earth surface processes, landforms and sediment deposits*[M]. New York: Cambridge University Press, 2008: 815.
- [34] Allen J R L. *Physical Processes of Sedimentation*[M]. London: George Allen and Unwin, 1970: 248.
- [35] Dalrymple R W. Tidal depositional system[C]// Waters C N, James N P. *Facies Models*. Geological Association of Canada, 1992: 195-218.
- [36] Reinson G E. Transgressive barrier island and estuarine systems[C]// Walker R G, James N P. *Facies Models, Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, 1992:179-194.
- [37] Klein G D. A sedimentary model for determining paleotidal range [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82:2 585-2 592.
- [38] Klein G D. Determination of paleotidal range in clastic sedimentary rocks[C]// 24th international geological Congress, Montreal *Compte Rendus*, Section 6, Montreal, 1972: 397-405.
- [39] Klein G D. Clastic tidalites a partial retrospective view [C]// Alexander C R, Davis R A, Henry V J. *Tidalites: Processes and Products*. SEPM Special Publication, 1998: 61:5-14.
- [40] Coughenour C L, Archer A W, Lacovara K J. Tides, tidalites, and secular changes in the Earth-Moon system[J]. *Earth-Sciences Reviews*, 2009, 97:59-79.
- [41] Steel R J, Plink-Bjorklund P, Aschoff J. Tidal deposits of the Campanian Western Interior Seaway, Wyoming, Utah and Colorado, USA[C]// Davis R A, Dalrymple R W. *Principles of tidal sedimentology*. Netherlands: Springer. 2012, 437-472.
- [42] Krumbein W E. The year of the slime[M]// Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Oldenburg (BIS)-Verlag, 1994:1-7.
- [43] Noffke N, Gerdes G, Klenke T. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic)[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003,

- 62: 163-176.
- [44] Schieber J, Banerjee S, Bose P K, et al. Atlas of Microbial Mat Features Preserved in the Siliciclastic Rock Record [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [45] 齐永安. 河南鲁山汝阳群云梦山组遗迹化石[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 33-37.
- [46] Noffke N, Beukes N, Gutzmer J. et al. Spatial and temporal distribution of microbially induced sedimentary structures: a case study from siliciclastic storm deposits of the 2.9 Ga Witwatersrand Supergroup[J]. South Africa. Precambrian Research, 2006a, 146(1-2): 35-44.
- [47] 梅冥相, 孟庆芬, 刘智荣. 微生物形成的原生沉积构造研究进展综述[J]. 古地理学报, 2007b, 9(4): 353-367.
- [48] 梅冥相. 微生物席沉积学: 一个年轻的沉积学分支[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6): 586-597.
- [49] 史晓颖, 王新强, 蒋干清, 等. 贺兰山地区中元古代微生物席成因构造——远古时期微生物群活动的沉积标识[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 575-586.
- [50] 史晓颖, 张传恒, 蒋干清. 华北地台中元古代碳酸盐岩中的微生物成因构造及其生烃潜力[J]. 现代地质, 2008b, 22(5): 669-682.
- [51] Miller J A. Facies characteristics of Laguna Madre wind tidal flats[C]// Ginsburg R N. Tidal deposits. New York: Springer, 1975: 67-73.
- [52] Gerdes G, Klenke T, Noffke N. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue[J]. Sedimentology, 2000, 47(2): 279-308.
- [53] Noffke N, Beukes N, Bower D, et al. An actualistic perspective into Archean worlds-(cyano) bacterially induced sedimentary structures in the siliciclastic Nhlazatse Section, 2.9 Ga Pongola Supergroup[J]. South Africa. Geobiology, 2008, 6(1): 5-20.
- [54] Grotzinger J P, Knoll A H. Stromatolites in Precambrian carbonates Evolutionary mile posts or environmental dip sticks? [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1999, 27: 313-358.
- [55] Riding R, Liang L. Geobiology of microbial carbonates Metazoan and sea water saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 219: 101-115.
- [56] Frey R W, Basan P. Salt marshes[M]// Davis R A. Coastal sedimentary environments. 2nd ed. Heidelberg: Springer, 1985: 225-301.
- [57] Dawes C J. Marine botany[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
- [58] Murakoshi N, Nakayama N, Masuda F. Diurnal inequality pattern of the tide in the upper Pleistocene Palaeo-Tokyo Bay: reconstruction from tidal deposits and growth-lines of fossil bivalves[J]. Int Assoc Sediment Spec Publ, 1995, 24: 289-300.
- [59] 夏文杰. 陆源碎屑潮汐沉积的判别标志[J]. 石油实验地质, 1982, 4(4): 285-293.
- [60] Greb S F, Archer A W. Rhythmic sedimentation in a mixed tide and wave deposit, Hazel Patch sandstone (Pennsylvanian), eastern Kentucky coal field[J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65: 96-106.
- [61] Archer A W. Modelling of cyclic tidal rhythmites based on a range of diurnal to semi-diurnal tidal-station data[J]. Marine Geology, 1995, 123: 1-10.
- [62] Reineck H E, Singh I B. Depositional Sedimentary Environments[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1973: 551.
- [63] Kvale E P, Archer A W, Johnson H R. Daily, monthly and yearly tidal cycle within laminated siltstones of the Mansfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana[J]. Geology, 1989, 17: 365-368.
- [64] Kvale E, Archer A W. Tidal deposits associated with low-sulfur coals, Brazil Formation (Lower Pennsylvanian), Indiana[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1990, 60: 563-574.
- [65] Dalrymple R W, Makino Y, Zaitlin B A. Temporal and spatial patterns of Rhythmite deposition on mud flats in the macrotidal Cobequid Baya Salmon river estuary, Bay of Fundy, Canada[C]// Smith D G, Reinson G E, Zaitlin B A, et al. Clastic Tidal Sedimentology. Canadian Society Petroleum Geologists Memories, 1991, 16: 137-160.
- [66] Archer A W. Panthalassa: paleotidal resonance and a global paleocean-seiche[J]. Palaeoceanography, 1996, 11: 625-632.
- [67] Klein G D. Depositional and dispersal dynamics of tidal sand bars[J]. J Sediment Petrol, 1970, 40: 1095-1127.
- [68] Collinson J D. Deltaic sedimentation in the Upper Carboniferous of northern England[J]. Sedimentology, 1968, 10: 223-254.
- [69] Nio S D, Yang C S. Diagnostic attributes of clastic tidal deposits: a review[C]// Smith D G, Reinson G E, Zaitlin B A, et al. Clastic Tidal Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geology, Memories, 1991: 3-28.
- [70] Boyd R, Dalrymple R W, Zaitlin B A. Classification of clastic coastal depositional environments[J]. Sedimentary Geology, 1992, 80: 139-150.
- [71] Dalrymple R W, Yang B C, Chun S S. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: Summer tidal flat-winter shoreface-Reply[J]. Sedimentology, 2006, 53: 693-696.
- [72] Hale P B, McCann S B. Rhythmic topography in a mesotidal, low-wave-energy environment[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1982, 52: 415-429.
- [73] Yang B C, Gingras M K, Pemberton S G, et al. Wave-generated tidal bundles as an indicator of wave-dominated tidal flats[J]. Geology, 2008, 36: 39-42.

- [74] Davis R A, Dalrymple R W. Principles of Tidal Sedimentology[M]. New York: Springer, 2012:621.
- [75] Berné S, Castaing P, Le Drezen E, et al. , Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large sub-tidal dunes in the entrance to Gironde Estuary (France) [J]. Journal of Sedimentary Research, 1993, 63: 780-793.
- [76] Bartholdy J, Bartholomae A, Flemming B W. Grain-size control of large compound flow-transverse bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea[J]. Marine Geology, 2002, 188(3/4): 391-413.
- [77] 高林志, 尹崇玉, 王自强. 华北地台南缘新元古代地层的新认识[J]. 地质通报, 2002, 21(3): 130-135.
- [78] 周洪瑞. 豫西地区中、新元古代地层沉积特征及层序地层学研究[J]. 现代地质, 1999, 12(1): 17-24.
- [79] 杨式溥, 周洪瑞. 豫西前寒武纪汝阳群遗迹化石[J]. 地质论评, 1995, 41(3): 205-210.

PALAEOTIDAL SIGNATURE IN TIDAL DEPOSITIONAL SYSTEM: AN EXAMPLE FROM LUSHAN SECTION OF PROTEROZOIC IN YUXI DISTRICT

WU Heyuan

(Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Recent researches unveil that the modern tidal depositional system, as a window of ancient tidal deposits, has provided a theoretical foundation and a recognition basis for the reconstruction of tidal depositional environment. The different tidal classification and tidal flat zoning systems were made upon the response of sedimentary environment to various tidal signatures. The research of microbiological deposits in the modern tidal system suggests that the biogenic tidal signal should be adopted to the study of ancient tidal deposits. The fruitful achievements of physical palaeotidal signature may provide a solid foundation for paleoenvironmental reconstruction. Based on the new progress in palaeotidal signatures, this paper takes the sedimentary sequence of the Lushan section in the Yuxi district as an example to provide a reference for regional paleoenvironmental reconstruction.

Key words: tidal sedimentary system; palaeotidal signature; Yuxi; Proterozoic