

文章编号: 1000-0550(2010)01-0118-10

潮流沙脊和沙波沉积结构特征^①

——以西班牙东北部比利牛斯前陆盆地 Roda 砂岩组为例

阮伟^{1,2} 黄洁^{1,3}

(1. 中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083;

2. Department of Geological Sciences, Jackson School of Geosciences, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712, U. S. A;

3. Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78733-8924, U. S. A)

摘要 以位于西班牙东北部的比利牛斯前陆盆地(Pyrenean Foreland Basin)南部的 Roda 砂岩组三段为对象,研究潮流沙脊、沙波的内部结构特征。主要的沉积结构为大型楔状、板状交错层理,局部发育大型槽状交错层理,平行层理和小型波纹层理等。垂向上,板状交错层理呈向上变相变厚的趋势。潮汐束厚度周期性变化,复活面众多,双泥层不发育,局部可见鱼骨状交错层理。交错层理底部生物扰动强,内部较弱,贝壳碎屑常见,泥粒在交错层理底部普遍,古水流方向多变但主要以向西方向为主,主流方向与三角洲的前积方向呈锐角至平行关系,指示潮流沙脊和沙波共存。

关键词 Roda 砂岩 潮流沙脊 潮流沙波 大型交错层理 三角洲

第一作者简介 阮伟 男 1980 年出生 博士研究生 沉积学和层序地层学 E-mail: ruanwei1@126.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

潮流沙脊、沙波主要发育于河口,潮控三角洲前缘,海峡和潮控、浪控以及风暴频繁的浅海环境^[1-3]。在现代沉积中,中国的长江口、渤海湾、琼州海峡、北部湾、欧洲的北海、美国的佛罗里达海峡以及白令海峡等,都发育大规模的潮流沙脊和沙波^[4-7]。在现代潮汐环境中,这些沙脊可达 220 m 高,1~15 km 长,0.2~4 km 宽,沙脊和沙脊常常被潮道分开^[8],沙波规模略小,常与沙脊共存。在中国东海的长江口,水深在 60~120 m 的范围内,发育大量的潮流沙脊、沙波,规模之大堪称世界罕见(图 1)。潮流沙脊、沙波相油藏也很普遍,如加拿大阿尔伯达盆地的 Viking 组砂岩油藏和加拿大千鸟湖油田的 Bakken 组油藏砂岩,都是潮流沙脊、沙波相,其中千鸟湖油田的 Bakken 组油藏砂岩 30 m 厚 5 km 宽 50 km 长,砂质纯净,杂质少,储量丰富,是加拿大的油砂的重要产区。潮流沙脊、沙波在现代滨浅海发育广泛,而我国的海相油藏中目前还鲜有潮流沙脊、沙波相的报道,本文论述潮流沙脊、沙波的沉积结构特征,可以为国内同行研究类似油藏砂体沉积环境提供参考。

目前对潮流沙脊、沙波的研究,主要以现代沉积

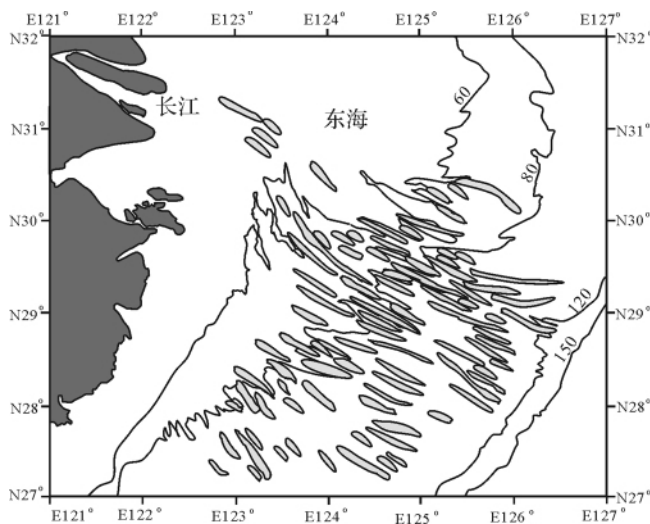


图 1 中国东海陆架潮流沙脊分布图(据 Liu^[6]有修改)

Fig. 1 Distribution of tidal sand ridges on the continental shelf in the East China Sea (Modified from Liu^[6])

为主,特别是对其的规模,形成条件等,但对潮流沙脊、沙波内部结构目前研究还很少。位于西班牙北部的比利牛斯前陆盆地(Pyrenean Foreland Basin)南部的 Roda 砂岩组,由于暴露良好,被公认为研究潮流沙脊、沙波的理想场所。

^①BITE Industry Consortium 研究项目 由 Shell, Conocophillips, Statoil, Nexen, Devon, Saudi Aramco 石油公司提供资金支持; 国家留学基金委资助项目。
收稿日期: 2008-10-14; 收修改稿日期: 2009-03-24

潮流沙脊,通常被称为 Tidal Bar, Tidal Ridge 或者 Tidal Bank, 它的长轴延伸方向通常与潮流主方向呈锐角至平行关系。潮流沙波,通常被称为 Tidal Dune 或 Tidal Wave, 其长轴的延伸方向通常垂直于潮流主方向。潮流沙脊的迁移方向与古水流方向呈锐角关系,而潮流沙波的迁移方向与古水流一致,所以在野外可以通过砂体的前积方向区分潮流沙脊、沙波(图 2)。

潮流沙脊和沙波通常可以共存,在潮流沙脊上,可以发育沙波,在现代沉积中,潮流沙脊上发育这些沙波,作为潮流沙脊目前仍然活动而没有死亡的重要标志。

1 地质背景

早始新统 Roda 砂岩组露头位于西班牙东北部的 Tremp-Graus 盆地(图 3),处于比利牛斯前陆盆地(Pyrenean Foreland Basin)的南部,它是由早第三纪时比利牛斯前陆盆地向南冲覆破裂而形成的^[9]。Tremp-Graus 盆地长轴方向为 ESE—WNW,长约 100 km,宽约 20 km。Roda 砂岩组地层形成于早始新世,主要由潮控浅海砂岩和碳酸岩组成^[10]。Roda 砂岩组顶底均为生物碎屑岩,底部的 La Puebla 生物碎屑碳酸盐岩和顶部的 El Villar 生物碎屑碳酸盐岩延伸范围大,作为 Roda 砂岩组的界面很容易识别(图 4)。Roda 砂岩组从下到上可分为 Roda 砂岩组一段、二段和三段,每段厚度约为 30 m,主要为块状砂岩和交错层理砂岩组成。

Roda 砂岩组近 30 年来被不少地质学家研究,然而他们的解释却常常相互矛盾。Nio 等^[11]最早在 70 年代中期认为陆架沙波,后来 Nio, Yang 等^{[12][13]}认为是退潮三角洲,而 Puigdefabregas 等^[14]认为是潮流改造的扇三角洲。Mutti 等^[15]则认为是潮控河口沉积, Tinterri^[16]最新的研究认为主要为三角洲和潮流沙脊相。但这些学者多重视潮流沉积与三角洲沉积的交互关系,但对潮流沙脊的内部结构探讨不多。

本文以 Roda 组砂岩三段为例,研究潮流沙脊、沙波的内部结构。Roda 砂岩三段主要为受波浪、潮流影响的三角洲沉积,呈 NE—SW 方向前积,厚度约为 30~40 m,前人研究^[12]认为主要的沉积亚相可分为:三角洲平原,三角洲前缘,潮流沙坝,和陆架浅海沉积。地层倾向为 SW 方向,倾角约为 5°~8°,地层连续,构造不发育,由于河流的切割作用,沿 Isabena 河及其支流,地层暴露良好,且植被不发育,适合作为

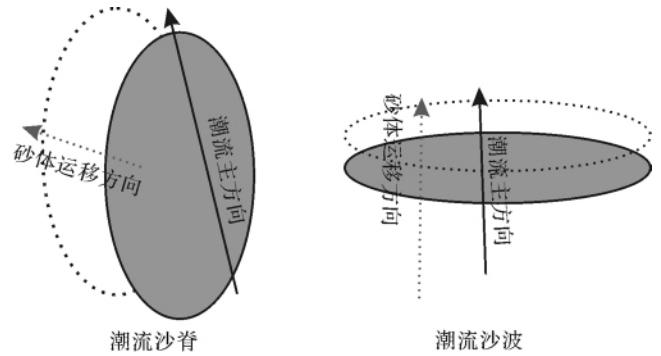


图 2 潮流沙脊、沙波示意图。潮流沙脊表现为长轴方向与潮流主方向呈一定角度的夹角,砂体运移的方向与潮流主方向也呈一定角度的夹角。潮流沙波的长轴方向与潮流主方向呈垂直关系,砂体的运移方向也与潮流主方向呈垂直关系。

Fig. 2 The sketch maps of the tidal ridge and tidal wave. The tidal ridge usually appears that the domain direction of tidal currents is oblique to crossing trend of long axis and direction of sandbody migration. However, the tidal wave is characterized by that domain direction of tidal currents is orthogonal to the trend of long axis and direction of sandbody movements.

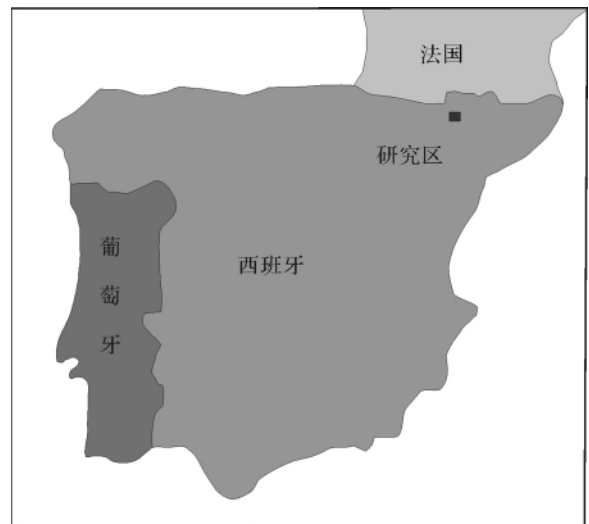


图 3 研究区的地理位置

Fig. 3 The location of study area

野外露头进行地质研究。Roda 砂岩三段顶底同为生物碎屑岩,而且分布范围广,适于作为标志层,进行地层连接和对比。Roda 砂岩三段底部主要以块状细砂岩为主,以三角洲相为主,顶部为中粗砂岩,板状交错层理,潮汐相为主。本次研究主要集中研究 Roda 砂岩三段的水深较深的部分,包括三角洲前缘和潮流砂体的研究,对上游的三角洲平原部分基本没有涉

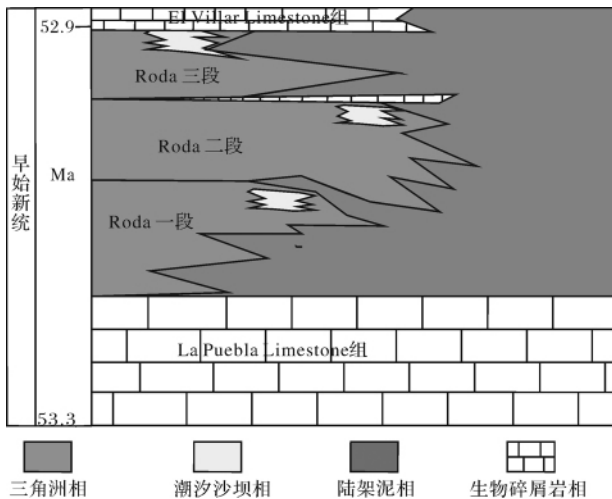


图4 Roda 砂岩组地层综合图(据 Tinetti^[16] 略有改动)

Fig.4 General stratigraphic cross section of the Roda Sandstone (slightly modified from Tinetti)

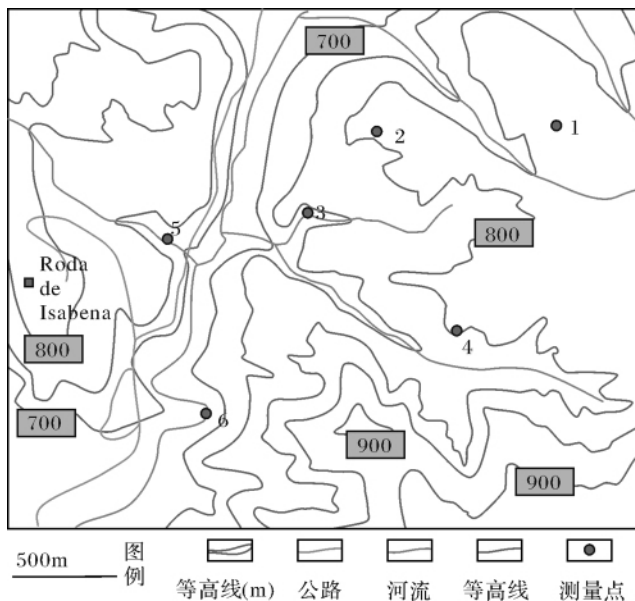


图5 测量点位置和研究区地形图

Fig.5 Location of measure point and topographic map of the study area

猎。主要的测量剖面6个,古流向测量数百个,主要位于 Isabena 河流和其支流的两岸(图5)。

Roda 砂岩组三段的下半段为细砂岩,厚度约为4~20 m,主要的沉积结构为块状,地层平缓,倾向为SWS方向,未见反方向古水流,侧向延续性好,单层可延续100 m以上,厚度变化不大。砂岩中含有植物碎片,偶尔有泄水构造和软沉积变形。虫孔发育,主要为 Ophiomorpha 和 Skolithos。砂岩含泥量高,30%

左右,细砂岩为主。向上厚度变大,粒度增加,呈反韵律。牡蛎类贝壳碎片偶尔出现。河道不多见,在数千米的剖面,仅发现河道2个。

沉积环境解释:遗迹化石显示沉积环境为海相,砂岩呈反韵律,泄水构造和软沉积变形,指示高沉积速率^[17]。地层倾角小,连续性好,且含植物碎屑,河道发育,细砂岩且含泥量高、反粒序,指示为三角洲相,而主要以块状细砂岩为主,未见泥炭层、泥裂和雨痕等,指示应为三角洲前缘,而河道不发育,可能由于逐渐分叉变小,河道形态不清晰,指示位于三角洲前缘的外缘^[18]。

Roda 组砂岩三段的上半部分,主要以大型交错层理为主,与三角前缘呈突变接触。下文将探讨这些大型交错层理为主的砂岩沉积环境。

2 潮流沙脊、沙波的沉积结构和解释

Roda 组砂岩三段的上半部分主要的沉积结构为大型交错层理,大型交错层理按照形态,可以分为A、B、C、D四类。在顶部也发育平行层理、小型交错层理、波纹层理等。粒度主要为细砂岩到中粗砂岩,粒度测量采用野外手持式电子放大镜,放大倍数为100倍(图6)。

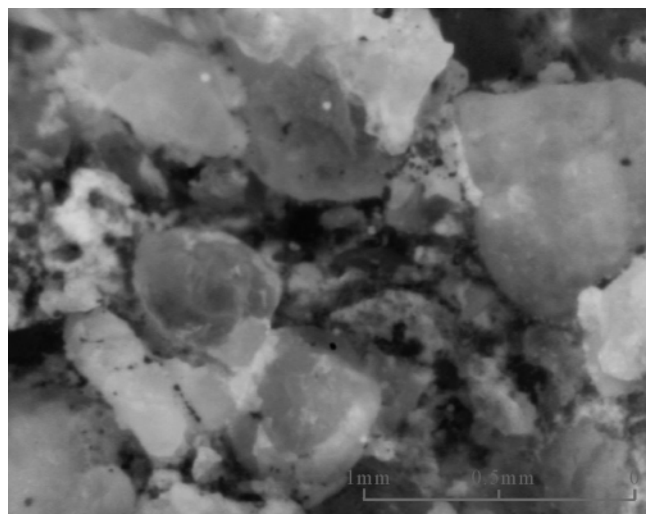


图6 通过野外手持式电子放大镜拍摄的放大100倍的照片显示,颗粒主要集中在0.3~0.8 mm范围,为细到粗砂岩

Fig.6 The sandstone is considered as fine sandstone to gritstone for the most grain size within 0.3~0.8mm from the image magnified 100 times by handheld electric magnifier

2.1 大型交错层理 A

主要以中粗粒砂岩为主,砂质纯净,不含杂基,层

厚 0.3 ~ 1.5m, 层系面呈平面状, 彼此不平行, 延续一定距离可以相交, 呈楔状, 有时层系面也相互平行, 呈板状。纹层底部主要以切线形式与底板接触, 交角小。顶部被削截, 与上部层系面不整合接触。未见双泥层, 单小层厚度称周期性变化, 复活面众多, 前积方向变化不大, 未见鱼骨状交错层理, 主要呈向西方向前积, 与三角洲前缘的前积方向(南)约呈 70° 夹角。复活面表面, 特别是接近于底板的部位, 常常有薄泥层出现, 厚度一般小于 1 cm。生物扰动弱, 钻孔主要以 Ophiomorpha, Skolithos 为主, 贝壳较常见。纹层厚度呈周期性变化, 底部泥粒常见, 未见植物碎屑(图 7)。

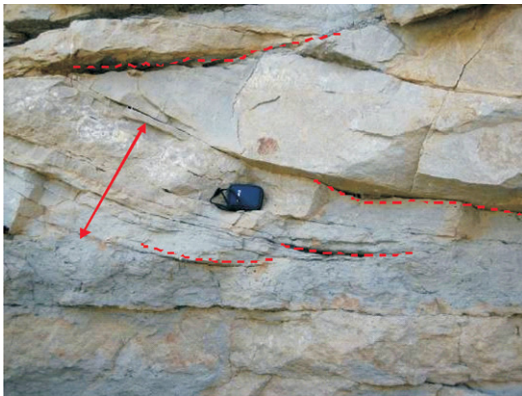


图 7 大型交错层理 A 相, 复活面上有薄泥层出现, 顶部被削截, 潮汐束厚度呈周期型变化

Fig. 7 The large scale cross-bedding of facies A. The thin mud drapes appear on the reactive surface, and the top of cross-beddings are eroded. The thickness of tidal bundles is periodically changed

2.2 大型交错层理 B

多发育于大型交错层理 A 的下部, 与 A 呈突变接触, 层厚约为 20 ~ 40 cm, 中粒砂岩为主, 砂质纯净, 不含杂基。纹层呈 S 型, 底部下切于下覆地层, 薄泥层常见, 泥层厚度小于 1 cm, 薄泥层多发育于交错层理的底部, 特别是复活面的底部更为常见(图 8)。未见鱼骨状层理, 纹层厚度呈明显的周期性变化, 内部复活面众多。生物扰动中等, 贝壳类碎屑常见, 交错层理的底部, 生物扰动强烈(图 9)。

2.3 大型交错层理 C

层系顶底面呈平面状, 相互平行, 小层呈平板状, 与顶底层系面呈角度接触, 为板状交错层理(图 10)。层厚约为 10 ~ 50 cm, 细到中粒砂岩, 不含杂基, 薄泥层常见, 泥层厚度小于 1 cm, 薄泥层多发育于交错层理的底部, 特别是复活面的底部更为常见。多位于大



图 8 大型交错层理 B, 复活面众多, 薄泥层普遍, 可见虫孔。图中尺子长 10cm

Fig. 8 The large scale cross-bedding of facies B, there are many reactive surfaces, and thin mud drapes are common with burrows being found in some place. The length of rule is 10cm



图 9 大型交错层理 B 的底面, 生物扰动强烈。铅笔长度为 12 cm

Fig. 9 On the bottom surface of large scale cross-bedding of facies B, bioturbation is intense. The length of pencil is 12cm

型交错层理 A 之下发育, 与大型交错层理 B 交互出现。鱼骨状交错层理常常出现(图 11), 纹层厚度呈周期性变化, 内部复活面众多。生物扰动较强, 特别在底部, 贝壳碎屑常见。

沉积环境解释: 大型板状或楔状交错层理, 在河口相, 三角洲相, 河道相, 以及潮汐相常见^[18~20]。双泥层主要被认为是潮汐沉积标志特征之一, 在涨潮和落潮的高能期, 水流的活动产生交错层理或波纹层理, 在低能期, 悬浮物下沉而产生泥层, 在涨潮与落潮不对称速度的潮下带环境常见^[21]。大量发育的复活面, 指示反向流体的存在^[22]。

复活面的形成过程(图 12), 可以分为 ABCD 四

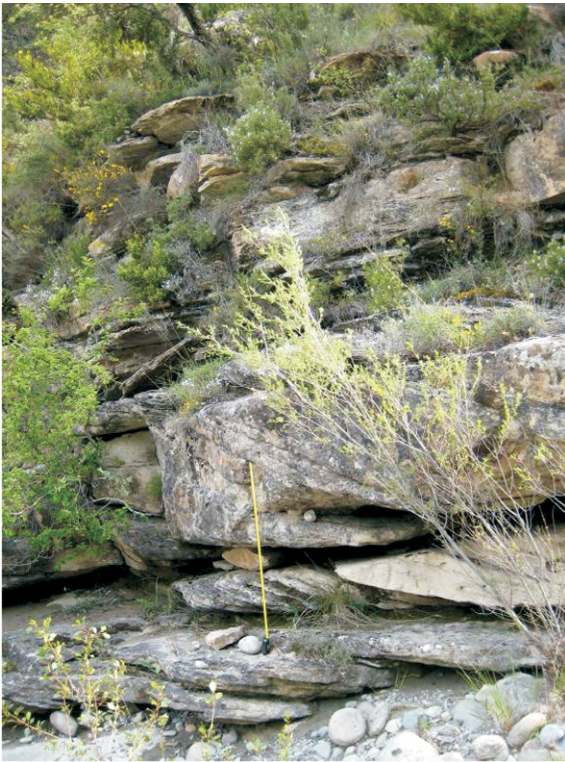


图 10 大型交错层理 C, 板状大型交错层理 (图中尺子长 50cm)

Fig. 10 The large scale cross-bedding of facies C—tabular cross-beddings. The length of ruler is 50cm



图 11 鱼骨状交错层理, 图中层厚约 15 ~ 20 cm

Fig. 11 Herringbone cross-bedding. The thickness of bedding is 15 ~ 20 cm or so

阶段 A 阶段, 为退潮末期, 水流速度低或为零, 沉积物主要以悬浮的泥质为主, 随后的 B 阶段, 为涨潮期, 水流方向为向岸方向, 速度大, 使得先前沉积的部分砂层和泥层剥蚀, 形成不整合面, 在沉积学上称之为复活面。C 阶段为涨潮末期, 水流相对平静, 于复活面上又沉积一层泥层, D 阶段为退潮期, 水流方向相反, 且水流速度大, 沉积物颗粒较粗。

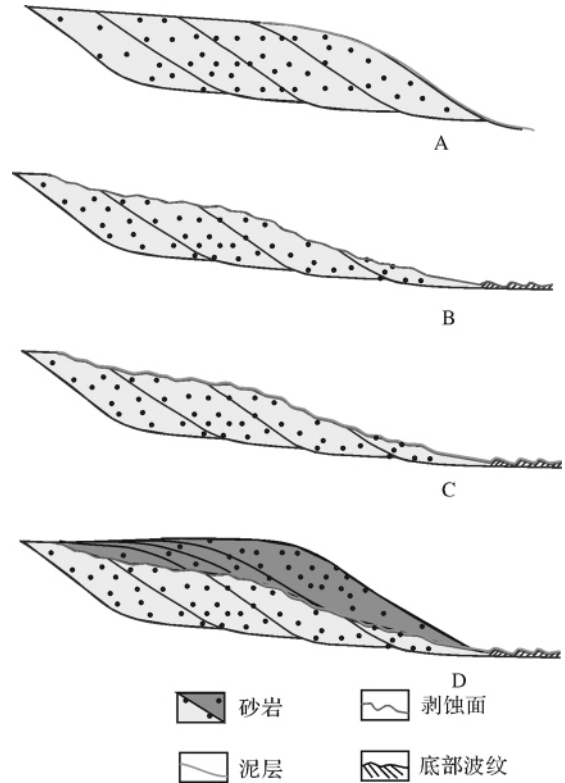


图 12 复活面形成过程示意图

Fig. 12 The schematic of process for forming reactive surface

鱼骨状交错层理, 是潮汐沉积结构的标志之一, 它主要是由于水流方向的变化引起的。薄厚沙层周期性出现(图 13), 也是潮汐环境的标志之一, 指示大潮和小潮交替出现^[23]。很多学者通过对露头潮汐束的厚度变化来推断古代地球自转的周期^[21, 22]。

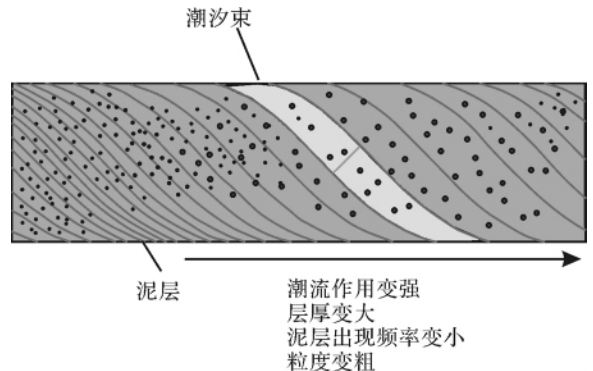


图 13 潮汐束厚度周期性变化示意图

Fig. 13 The sketch of tidal bundles thickness with periodic variation

砂岩非常干净, 含砂率几乎 100%, 不含杂基, 主要是由于水流反复筛选作用而成, 可以推断砂岩不是三角洲前缘相和河流相, 因为这类砂岩较脏, 含泥量大^[24]。

贝壳碎片常见,主要的遗迹化石为 *Ophiomorpha* 和 *Skolithos* 指示沉积环境为海相,且海底水流速度较高^[25]。大量的泥粒也表明水动力强,足以剥蚀床底。

综上所述,大型交错层理 A、B、C 都处于潮汐环境,水动力强,其中大型交错层理 A 单层厚度大,粒度粗,泥层少,且底部下切于底面,交角小,复活面众多,显示较 B、C 相水流速度更大,按照 Belderson 的理论^[26],潮流沙床波纹的厚度与水深有关,大概是水深的 1/3,指示交错层理越厚,水深越大。按照 Jopliling^[27]试验结果,底部切线接触比角度接触水动力更强。综合分析,指示大型交错层理 A 可能处于潮流流速更高,水体深度更大的环境。B、C 都发育泥层,且层厚和粒度略小,底面生物扰动较强,指示为潮流能量较弱的小潮期。

2.4 大型交错层理 D

大型交错层理 D 为大型槽状交错层理,位于大型板状交错层系内部,层厚可达 2~3 m,横向延伸可

达 3~4 m(图 14),主要岩型为中粒砂岩,而且常常出现倾向相反的现象,在露头研究的约 3 km 剖面上,发现不少于 3 个这种现象,说明这种现象非偶然出现。未见双泥层,纹层厚度周期性变化。泥粒常见,多为次圆状。

沉积环境解释:这种呈河道形状的砂岩,与周围砂岩有明显的整合现象,而砂岩较为纯净,与大型板状层理共生,指示潮流通道的相,而非河流环境,泥粒也指示了沉积水动力强。双向的交错层理,说明这种潮流通道的曲流河状,这种现象在现代沉积中也很普遍。

2.5 平行层理、小型交错层理、波纹层理

单层厚度 2~10 cm,中到粗砂岩,不含杂基,偶现薄泥层,生物扰动一般,多出现在大型楔形板状交错层理的顶部。主要的前积方向为西,鱼骨状交错层理普遍。层内小层厚度周期性变化不明显,底部一般被剥蚀(图 15)。

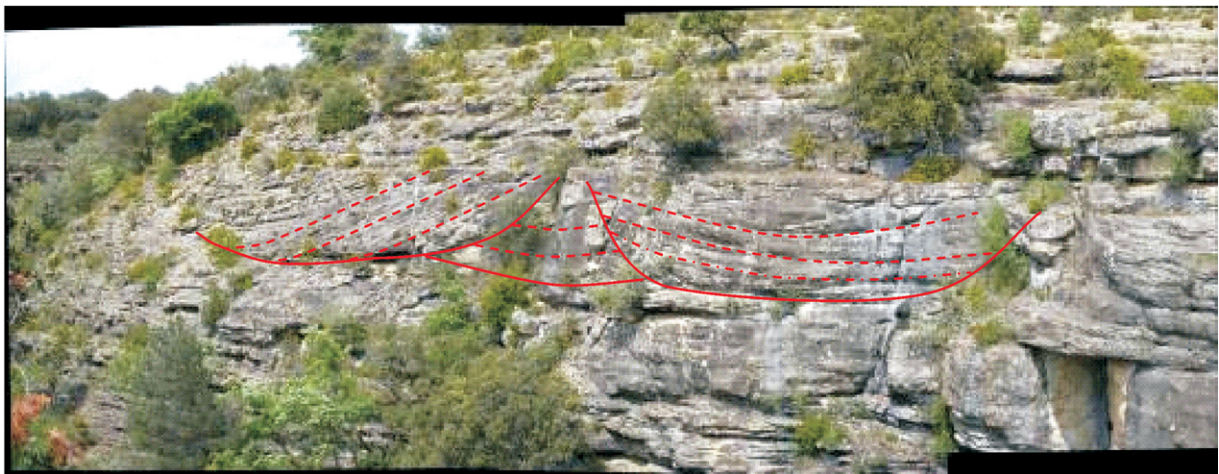


图 14 大型槽状交错层理,双向前积倾向,为潮道迁移而成

Fig. 14 The large scale tough cross-bedding with two direction trends is considered as a result of tidal channel migration

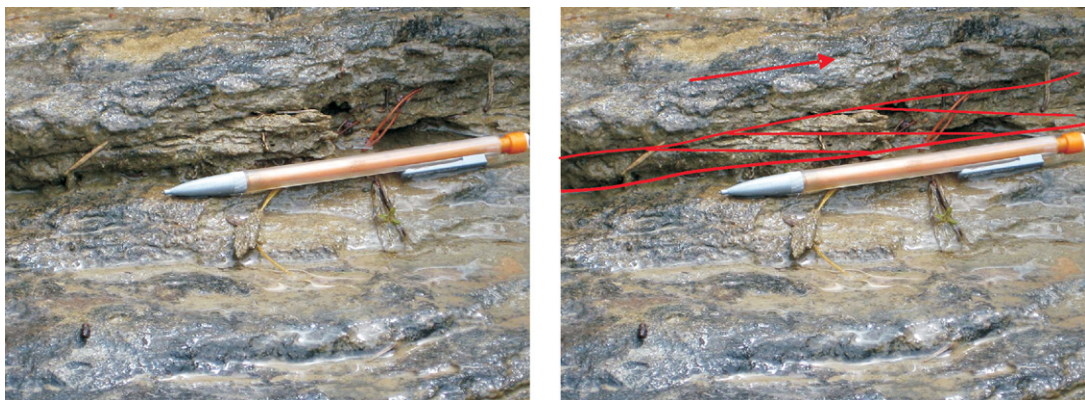


图 15 小型交错层理相,水流方向向左,顶部被削蚀

Fig. 15 The small scale cross-beddings, the direction of paleocurrent points to left and the top of bedding is truncated

沉积环境解释: 这些小型的交错层理主要由波纹的迁移形成, 波高小, 单层厚度薄, 由于粒度较大, 不含杂基, 指示水动力较强, 平行层理发育也证明水流作用强, 而这么大的水流速度, 水深很可能很浅, 因为如果水深很深, 底部水流又很高, 顶部水流速度就要更高, 一般的潮流很难达到这么高的水流强度。复活面发育, 薄泥层, 鱼骨状交错层理的出现, 指示处于潮汐环境, 由于单层薄, 而没有明显的出现潮汐束厚度的周期性变化, 主要前积方向为西, 指示潮流强度不对称, 向西方向较强。波纹层理的出现, 可能与当时沉积处于小潮期, 潮流强度弱有关。综合以上可以判断, 沉积环境可能为潮流沙脊或沙波的顶部, 潮流沙脊发育可能接近死亡, 水流较浅, 速度大, 沉积供给少。

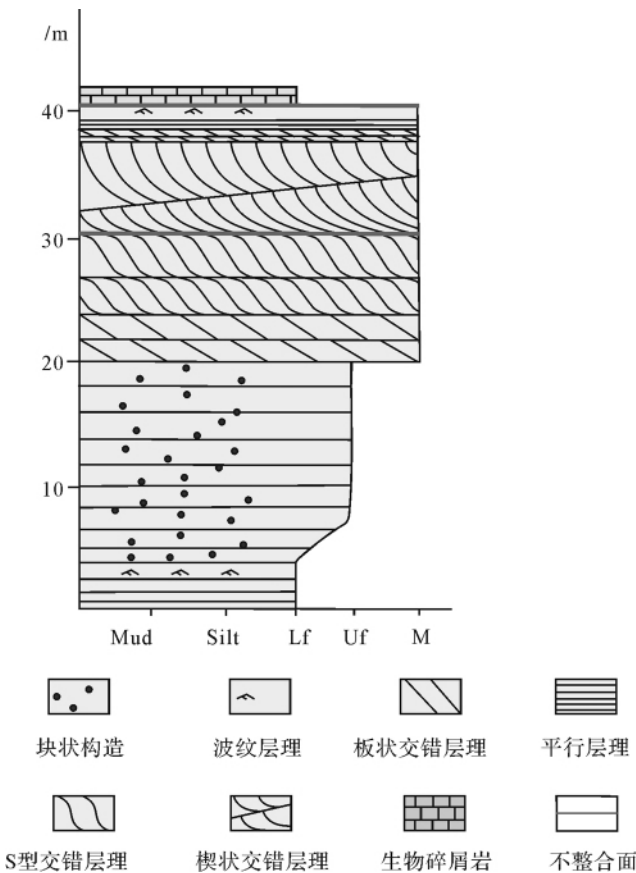


图 16 潮流沙脊、沙波的柱状结构模式图

Fig. 16 Generalized stratigraphic column model of tidal bars and tidal dunes

综合以上观察分析, 潮流沙脊的垂相结构模式(图 16)所示, 潮流沙脊、沙波发育于三角洲前缘的上

部, 潮流沙脊、沙波复合体从底到顶, 沉积结构从底部三角洲的块状沉积结构, 到大型交错 B、C 到 A 交错层理, 厚度逐渐增加, 水深变大, 水动力变强, 这恰恰是潮汐沉积的一个特征。顶部厚度突然减小, 为薄层平行层理、小型交错层理、波纹层理的出现, 可能标志潮流沙脊接近死亡的状态。

3 潮流沙脊、沙波的迁移方向

通过观察发现, 古水流方向变化大, 同一地层在相近的地点, 古水流方向就有很大变化(图 17)。这可能是潮流沙脊和其上发育的沙波叠加造成的。交错层理的指向代表砂体的迁移方向, 沙脊的迁移方向与潮流主方向呈斜交关系, 而沙波的方向与潮流主方向一致, 潮流沙脊上发育沙波等, 可以使得交错层理的倾向多变, 这也是潮流沙脊的一个显著特征。

通过对 6 个研究点进行的古水流方位角测量, 结果(图 18)所示, 主要古水流方向为向西方向, 但不集中, 变化范围大, 其中有两个剖面显示古水流为双向, 显示潮汐环境的特征。潮流沙波的交错层理方向变化小, 与潮流方向一致, 而潮流沙脊的交错方向多变^[3], 特别是当潮流沙脊上叠加有潮流沙波时, 层理前积的方向更加复杂。表明研究区主要是以潮流沙脊和其上叠加的潮流沙波为主, 而非单独的潮流沙脊。



图 17 古水流方向多变

Fig. 17 The orientation of paleocurrent is multivariant

在研究区也可以发现, 如图 19 所示, 这种丘状外形, 迁移方向与三角洲前积方向一致, 在三角洲前积方向的纵切面呈丘状, 指示砂体的长轴方向与三角洲前积方向垂直, 应为潮流沙波。

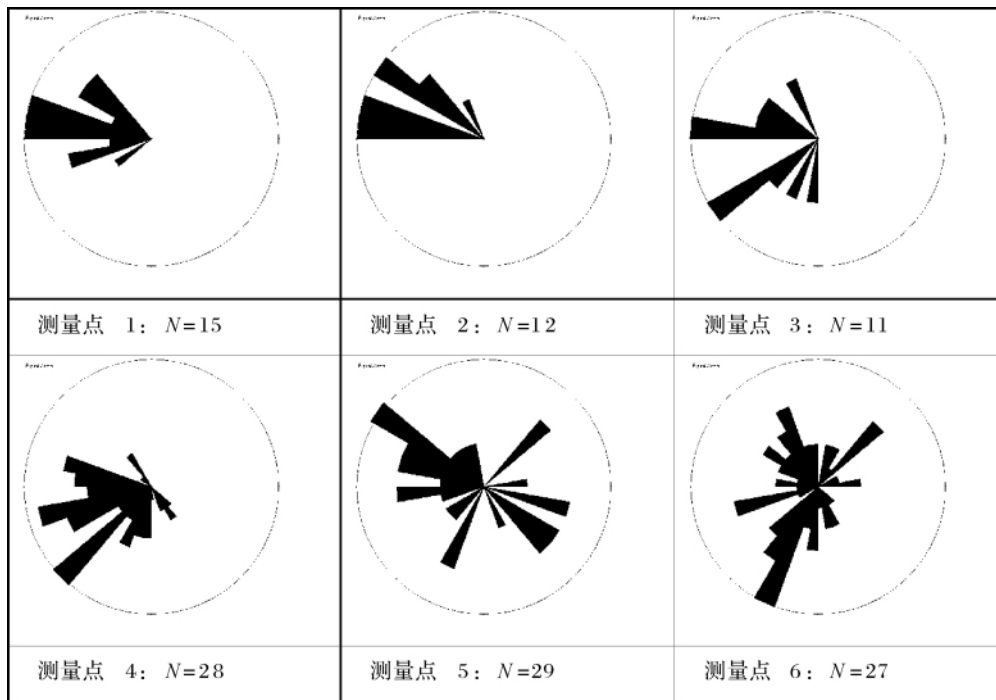


图 18 6 个测量点古流向玫瑰图
Fig. 18 The rose diagrams in six measure sites

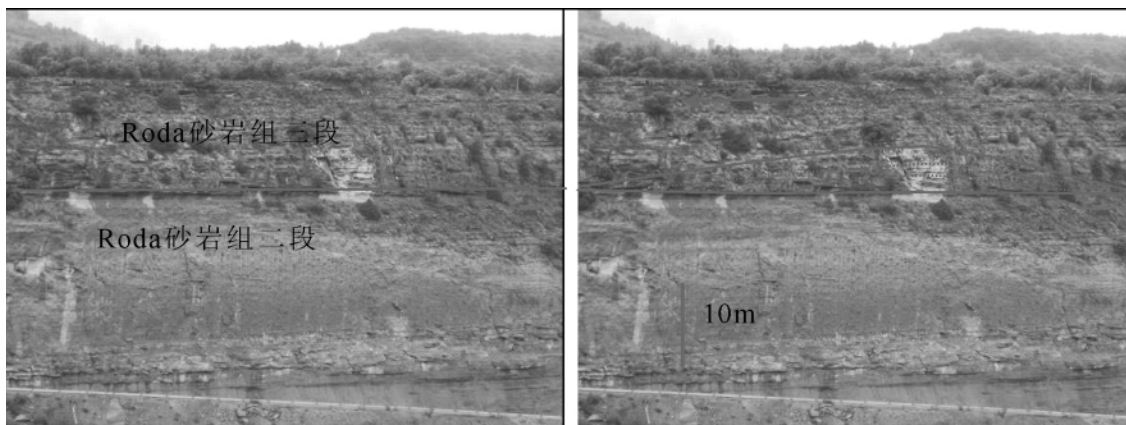


图 19 丘状外形,砂体迁移方向与三角洲前积方向一致被认为潮流沙波相

Fig. 19 The mounded externality, with the same orientation of sandbody migration with delta progradation is recognized as tidal wave

4 结论

潮流沙脊和沙波可以发育于河口,开阔陆架,三角洲前缘和海峡等环境,本研究区潮流沙脊和沙波相主要以大型交错层理为主,砂体不含杂基,粒度以中粒为主,垂相上向上显示水深变深,粒度变粗,纹层厚度周期性变化,复活面众多,双泥层不发育,可见鱼骨状交错层理,除顶底外,生物扰动较弱,贝壳碎屑常见,泥粒普遍,水流方向多变,潮流通道常见,潮流沙

脊和沙波共生。

致谢 本研究受 BITE Industry Consortium 支持。特别感谢 Shell, Conocophillips, Statoil, Nexen, Devon, Saudi Aramco 石油公司提供项目资金。从野外考察到文章思路和文章摘要的修改,University of Texas at Austin 的 Ron Steel 教授给予很大的帮助。在本人博士阶段学习和生活中,得到了导师中国地质大学(北京)能源学院于兴河教授帮助。衷心感谢 Jackson School of Geosciences, the University of Texas at Aus-

tin, U. S. A. 的支持和帮助。国家留学基金委提供了在美国学习的生活费, 在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- 1 Swift D J P. Coastal erosion and transgressive stratigraphy [J]. *Geology*, 1975, 76: 444-456
- 2 Dalrymple R W, Knight R J, Zaitlin B A *et al.* Dynamics and Facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River Estuary [J]. *Sedimentology*, 1990, 37: 577-612
- 3 Dalrymple R W, Rhoads R N. Estuarine dunes and bars [C]//Perillo G M E. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier Science, Amsterdam, 1995, 359-422
- 4 Park S C, Lee B H, Han H S, *et al.* Late Quaternary Stratigraphy and Development of Tidal Sand Ridges in the Eastern Yellow Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 1093-1105
- 5 Sophie L B, Alain T. Types of internal structure and external morphology of submarine dunes under the influence of tide- and wind-driven processes (Dover strait, northern France) [J]. *Marine Geology*, 2004, 211: 143-168
- 6 Liu Z X. Yangtze shoal: a modern tidal sand sheet in the northwestern part of the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 1997, 137(3-4): 321-330
- 7 Yang C S. Active, moribund and buried tidal sand ridge in the east China sea and the southern Yellow sea [J]. *Marine Geology*, 1989, 88: 97-116
- 8 Dalrymple, R W. Tidal depositional systems [C]//Walker R G, James N P. *Facies Models, Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, 1992: 195-218
- 9 Williams G D. Thrust tectonics in the south central Pyrenees [J]. *Structure Geology*, 1985, 7: 11-17
- 10 Nijman W, Nio S D. The Eocene Montanana delt (Trempe-Graus Basin, provinces of Lerida and Huesca southern Pyrenees, N. Spain) [C]. *International Association Sedimentology 9th Int. Congr.*, Nice, Part B, 1975: 20-21
- 11 Nio S D. Marine transgressions as a factor of formation of sand waves complexes [J]. *Geology Mijnb*, 1976, 55: 18-40
- 12 Nio S D, Siegenthaler C, Yang C. Facies pattern and development of the lower Eocene Roda sandstone, Isabena Valley, southern Pyrenees, Spain [C]. *5th IAS European Regional Meeting*, Marsiglia, 1984: 328-329
- 13 Nio S D, Yang C S. Sea-level fluctuations and the geometric variability of the tide-dominated sandbodies [J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70: 161-193
- 14 Puigdefabregas C, Munoz J M, Verge J. Thrusting and foreland basin evolution in the southern Pyrenees [C]//Mcclay K R. *Thrust Tectonics*. London: Chapman and Hall Lib, 1992: 247-245
- 15 Mutti E, Seguret M, Sgavetti M. Sedimentation and Deformation in the Tertiary Sequences of the Southern Pyrenees [C]. *AAPG Mediterranean Basin conference*, Parma, 1988: 135
- 16 Tinetti R. The lower Eocene Roda sandstone (south-central Pyrenees): an example of a flood-dominated river-delta system in a tectonically controlled basin [J]. *Rivista Italiana di Paleontologiae Stratigrafia*, 2007, 113(2): 223-255
- 17 Owen G. Experimental soft-sediment deformation; structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples [J]. *Sedimentology*, 1996, 43: 279-293
- 18 Olariu C, Bhattacharya J P. Terminal distributary channels and delta front architecture of rider-dominated delta systems [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 212-233
- 19 Shanmugam G, Poffenberger M, Toro J A. Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo ("T" and "U") Formations (Cretaceous), Sacha Field, Oriente Basin, Ecuador [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(5): 652-682
- 20 Banerjee I. Tidal sand sheet origin of the transgressive basal Colorado Sandstone (Albian): a subsurface study of the Cessford field, southern Alberta [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1989, 37: 1-17
- 21 Visser M J. Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note [J]. *Geology*, 1980, 8: 543-546
- 22 Allen P A, Homewood P. Evolution and mechanics of a Miocene tidal sand wave [J]. *Sedimentology*, 1984, 31: 63-81
- 23 Boer P L, Oost A P, Visser M J. The diurnal inequality of the tide as a parameter for recognizing tidal influences [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 912-921
- 24 Johnson H D, Levell B K. Sedimentology of a transgressive, estuarine sand complex: the Lower Cretaceous Woburn Sands (lower Greenland), southern England [C]//Plint G, *Sedimentary Facies Analysis*. IAS Special Publication No. 22, 1995: 17-46
- 25 Maceachern J A, Bann K L, Bhattacharya J P, *et al.* Ichnology of deltas: organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms, and tides [C]//Giosan L, Bhattacharya J P. *River Deltas: Concepts, Models, and Examples*. SEPM, Special Publication 83, 2005: 49-85
- 26 Belderson R H, Johnson M A, Kenyon N H. *Bedforms* [C]//Stride A H. *Offshore Tidal Sands, Processes and Deposits*. London: Chapman & Hall, 1982: 27-57
- 27 Jopling A V. Hydraulic factors controlling the shape of laminae in laboratory deltas [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1965, 35: 777-791

Sedimentary Architecture Characteristics of Tidal Bars and Dunes: An example from Roda Sandstone in Pyrenean Foreland Basin , NE Spain

RUAN Wei^{1,2} HUANG Jie^{1,3}

(1. School of Energy Resources , China University of Geosciences , Beijing 100083;

2. Department of Geological Sciences , Jackson School of Geosciences , University of Texas at Austin , Austin , Texas 78712 , U. S. A;

3. Bureau of Economic Geology , Jackson School of Geosciences , University of Texas at Austin , Austin , Texas 78733-8924 , U. S. A)

Abstract The outcrops of Roda Sandstone III are located in the southern Pyrenean Foreland Basin , in the northeast of Spain. The key sedimentary structures of the tidal ridges or waves are stacked sets of large scale wedge and tabular cross-strata as well as plane-parallel lamination , ripple lamination. In vertical section , the tidal ridges or waves show a trend of thickening and coarsening upwards. The thickness of tidal bunches vary periodically and the reactivation surfaces are common; double mud drapes are rare , but herringbone cross-strata can be. Bioturbation can be intense in the bottomsets of the cross-bedding. Shell fragments and mud clasts are common. The directions of paleocurrent were polydirectional , but most concentrated on westward direction , which is parallel to acute angle with the orientation of the progradation of delta front. The result suggests the tidal ridges and waves coexisted.

Key words Roda sandstone; tidal ridges; tidal waves; big scale cross-bedding; delta