

滨里海盆地东南缘石炭系 MKT 组“反向前积”构型的性质

代寒松¹, 陈彬滔¹, 郝晋进¹, 刘雄志¹, 洪亮¹, 赵旭², 邓国鑫¹

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:“前积”是油气勘探中常见的沉积构型, 多为沉积物由物源区向卸载区逐步堆积叠加而成, 其倾向指向卸载区。滨里海盆地东南缘中区块 MKT 组泥岩内部由一系列向西(早期隆起物源区)倾斜的“反向前积层”构成, 由于其成因存在较大的争议, 导致了研究区石炭系沉积演化规律缺乏统一认识, 制约了后续勘探工作的开展。文章以区域背景、钻井、地震资料为基础, 通过沉积作用、岩性、古地理位置、形态与规模等要素分析比较, 对“反向前积”的形成机理进行了探讨, 提出 MKT 组属于深水牵引流沉积而非水进退积楔, “反向前积”是其沉积物在深水牵引流作用下向陆迁移而形成的特殊沉积构型。最终, 文章尝试对 MKT 组沉积演化进行分析总结, 并将其划分为: 初始形成、强烈作用、晚期衰退和后期调整 4 个阶段。MKT 组深水牵引流沉积的发现不仅完善了滨里海盆地东南缘石炭系沉积演化规律, 为后期工作扫清了障碍, 丰富了盆地的沉积类型, 更为全球古生界深水牵引流研究提供了宝贵实例。

关键词:反向前积; 深水牵引流沉积; 向陆迁移; 水进退积楔; 沉积演化; 石炭系; 滨里海盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Nature of “reverse prograding deposits” at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

Dai Hansong¹, Chen Bintao¹, Hao Jinjin¹, Liu Xiongzhì¹, Hong Liang¹, Zhao Xu², Deng Guoxin¹

(1. Northwest Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Progradating deposits, a result of the progressive accumulation and superimposition of sediments transported from provenance to unloading areas, is a normal sedimentary configuration in petro-exploration, dipping to the unloading areas. The interior MKT Formation mudstone of the middle block at the southeast margin of Pre-Caspian Basin is composed of a series of “reverse prograding deposits” dipping west (i. e. towards the early uplifted provenances). As the origin of the sedimentary configuration has triggered many controversies, there is no consensus as to the sedimentation and evolution of the Carboniferous, which has constrained follow-up exploration. Through the analysis of regional setting, drilling and seismic data, we made a comparative analysis of such elements as depositional mode, lithology, paleo-geographic location, geometry and scale, discussed the genetic mechanism of the “reverse prograding deposits”, and proposed that the MKT Formation is deep water tractive current deposits, instead of a retrogradation wedge of transgression origin. Therefore, the “reverse prograding deposits” is a peculiar sedimentary configuration resulted from landward migration of sediments along with the deep water tractive current. In the end, we analyzed the evolution of the MKT Formation and divided it into four stages, namely initiation, peak, recession and late adjustment. The discovery of deep water tractive current deposits not only improves our understanding of the sedimentary evolution rules at the southeast margin of the Carboniferous Pre-Caspian Basin, paves the way for further exploration, and enriches the category of basin sedimentation, but also provides a precious case for global research on the Paleozoic deep water tractive current.

Key words: reverse progradation, deep water tractive current deposit, landward migration, retrograding, sedimentary evolution, Carboniferous, Pre-Caspian Basin

收稿日期: 2017-07-13; 修订日期: 2018-09-04。

第一作者简介: 代寒松(1981—), 男, 博士、工程师, 矿产普查与勘探。E-mail: dhs@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 赵旭(1982—), 女, 博士、高级工程师, 石油工程管理。E-mail: jinse6913@qq.com。

基金项目: 中国石油股份公司海外专项(2008E-1606)。

中区块位于滨里海盆地东南缘扎尔卡梅斯-延别克隆起东缘边界,东部紧邻东南拗陷带(图1)。MKT组厚层泥岩是该区石炭系主要盖层之一,其内幕由一系列西倾(沉积期古隆起物源方向)“反向前积层”叠加而成。目前,由于该构型的成因缺乏合理解释,致使石炭系沉积演化规律认识不清晰,制约了后续勘探工作的深入。本文旨在以区域背景资料为前提,基于井震结合,在岩性、地震相、古地理位置与形态规模等方面进行分析对比,判定 MKT 组沉积性质,明确其发育模式,为后续勘探工作扫清障碍。

1 MKT 组基本特征

中区块上石炭统 MKT 组,是莫斯科中期发育的一套陆棚斜坡相深水沉积,厚度在 0~600 m,岩性以泥岩为主,夹薄层粉砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩与灰岩。钻井揭示泥岩含量介于 60%~95%,平均为 78%。该组底部与 KT-II 组灰岩(莫斯科阶下段)突变接触,顶部与 KT-I 组灰岩(莫斯科阶上段)呈渐变过渡关系,发育一套厚 20~50 m 的斜坡-台地相过渡沉积。MKT 组面积约为 2 500 km²,具东厚西薄、东高西低的

特征,其内部由一系列西倾“前积层”构成,“前积层”相互以叠瓦或近平行斜列的方式排列,逐步向西倾没于 KT-II 组顶部(图2)。

晚石炭世莫斯科期,滨里海盆地东南缘处于被动大陆边缘向弧后盆地转换的初始阶段,具有西高东低的古地形特征(图3)。二叠纪末强烈的乌拉尔造山运动才导致了盆地东侧构造抬升反转^[1-3]。因此,MKT 内部的西倾“前积层”与晚石炭世古构造方向相反,是典型的“反向前积”构型。

2 成因及性质推断

2.1 “反向前积”构型成因及特点

沉积学研究中,对于向陆迁移的“反向前积”构型有水进退积楔模式与深水牵引流模式两种解释。

水进退积楔模式: Bruun (1962), Helland-Hansen (1994) 和 Antonio Cattaneo (2002) 等学者在研究水进与海岸侵蚀关系时发现^[4-6],当海平面快速上升导致可容纳空间增加幅度明显大于陆源碎屑注入量时,在斜坡处沉积物可能形成丘-楔状堆积体,伴随着水体持续增加,物源供给的减弱,新的堆积体逐步向岸退

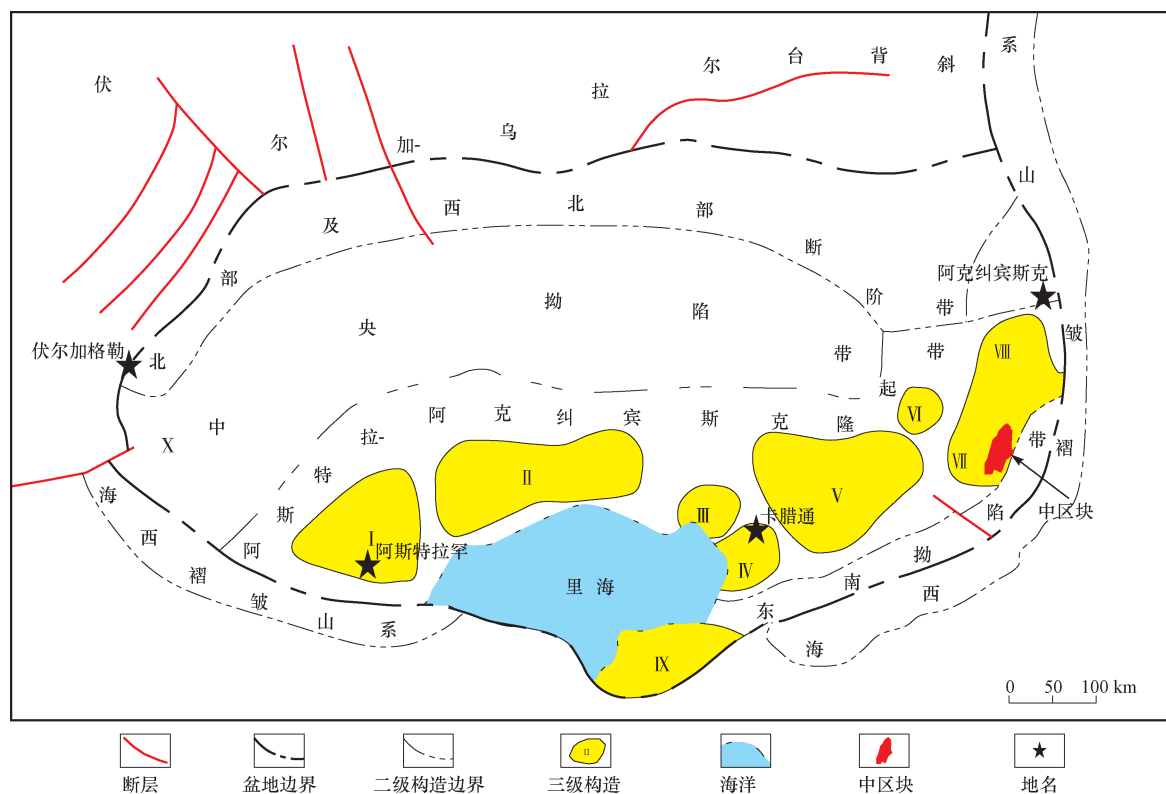


图1 滨里海盆地东南缘中区块位置

Fig. 1 Location of the middle block at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

I. 阿斯特拉罕地块; II. 北海隆起; III. 库萨科夫隆起; IV. 腊通-田吉兹隆起; V. 比尔可扎特隆起; VI. 克斯克乌拉隆起; VII. 扎纳诺儿隆起; VIII. 特梅尔隆起; IX. 卡扎钦隆起; X. 萨尔平拗陷

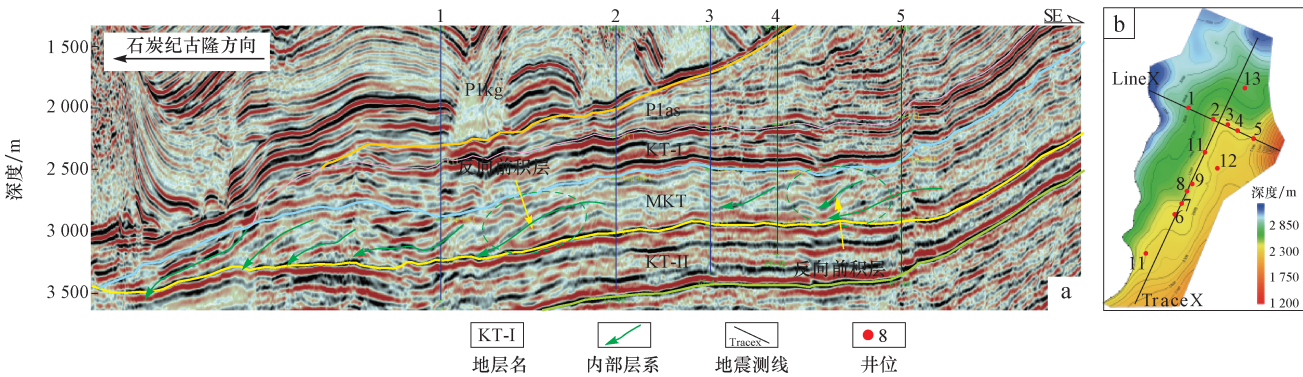


图 2 滨里海盆地东南缘中区块 LineX 线解释图(a)及 MKT 顶面构造图(b)
Fig. 2 Interpretation map of Seismic Line X(a) and structural map of top MKT(b) in the middle block at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

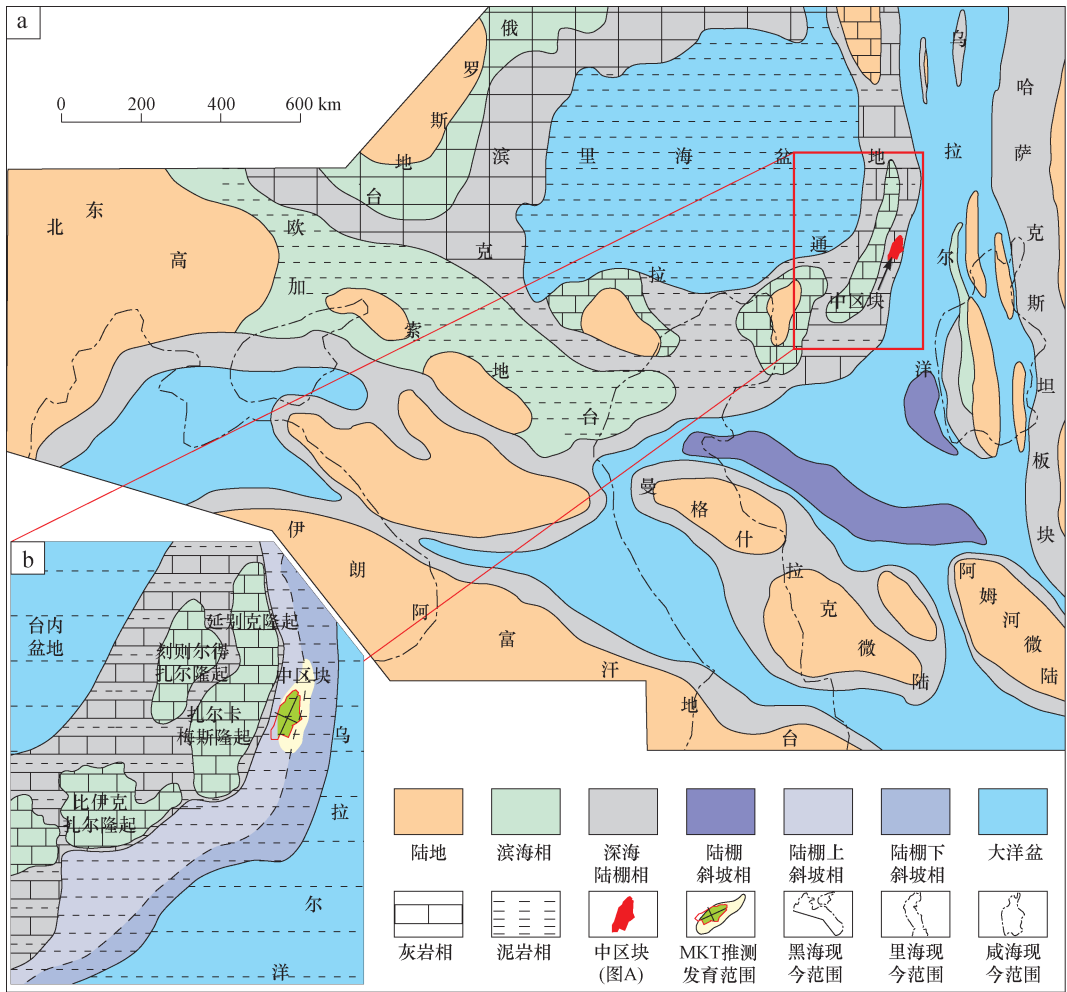


图 3 中亚莫斯科期岩相古地理图(a)及滨里海盆地东南部莫斯科中期岩相古地理图(b)
Fig. 3 Lithofacies paleogeographic map of the Moscovian in Middle Asia(a) and the lithofacies paleogeographic map of the Middle Moscovian in southeast Pre-Caspian Basin(b)

积,并侧向叠置,最终形成类似向陆迁移的“反向前积”构型(图 4)。

水进退积楔多发育在陆棚上靠近滨岸带且具一定水体深度的区域。由于物源主要为滨岸带及后方侵蚀

区的砂体,其岩性以细-粉砂岩为主。纵向上,退积楔岩性具向上变细的正旋回特征,印证了水体快速加深过程中,退积楔逐步向岸迁移的特点。

深水牵引流模式:深水牵引流普遍发育在海洋水

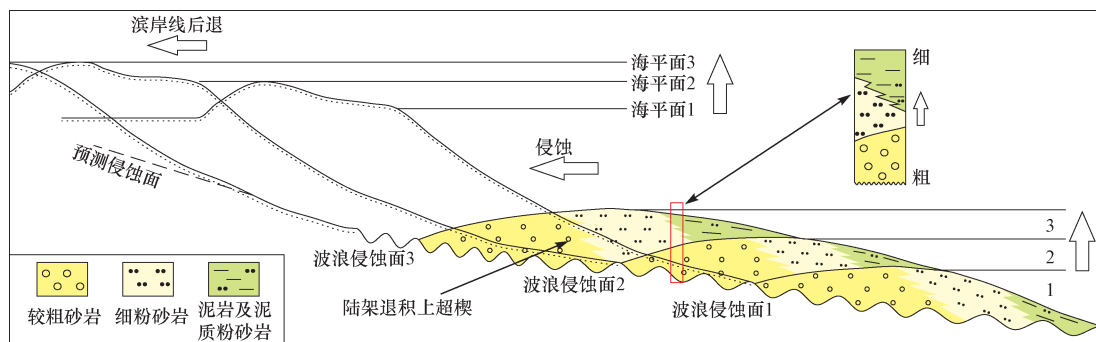


图4 水进退积楔发育模式图(据文献[6]修编)

Fig. 4 Development model of transgressive retrogradation wedge(modified from reference[6])

体较深的区域(陆棚斜坡、陆隆或深海洋盆),有等深流与内波两种流体形式,其沉积作用主要体现在对先期或同期松散沉积物的二次改造^[7-11]。

等深流指由地球旋转以及海水温盐差异而形成的平行于陆坡以及海底等深线作稳定流动的环流,其向陆迁移作用表现为等深流体在科式效应下形成螺旋流,并对向陆一侧的松散沉积物进行侵蚀、扬弃形成雾状层(图5a-1),之后在向海盆一侧沿不同海水密度面悬浮漂移过程中逐步沉降。当雾状层中存在少量细粉砂等较大颗粒时,悬浮漂移距离减小,整体沉积速度加快形成一系列向陆迁移的“反向前积层”^[7-10](图5a-2)。内波是海水不同水层或密度梯度之间,由于扰动等作用影响形成的波动传递。其相关成因模式指近沉积底面高密度水层中,内波引起的底流方向与其传播方向相反(内波通常由浅水向深水传播),导致松散沉积物在不发生悬浮的情况下形成与内波形态规模相当的沉积底形,并逐步向陆方向发生迁移,从而形成一系列的“反向前积层”^[7,11](图5b)。

近40年来,全球海洋中大量新生代深水牵引流沉积(如中国南海、北大西洋周缘、新西兰坎特伯雷与爱尔兰 Feni 地区等^[7-13])以及众多古生代深水牵引流沉积露头的发现(塔中、浙江桐庐,湘西北九溪与沅古坪地区等^[7,14-16]),进一步证实了“反向前积”是该类沉积体中的常见构型。

研究表明,深水牵引流沉积形成于快速水进期,在陆棚斜坡普遍发育,形态上多呈丘状,内部“反向前积层”多平行于构造线分布^[12,14]。由于物源供给较为缺乏,其岩性主要以泥岩夹薄层碎屑岩和灰岩为主,而沉积体内“反向前积”与岩性无相关性,泥岩与非泥岩段均有“反向前积层”发育^[9-14]。深水牵引流受控于区域性(或全球性)大范围海水温盐差与密度差,其作用范围普遍较大,相关沉积体发育规模普遍大于常规重力流沉积^[7,13],如北大西洋周缘发育的16个大型

现代等深岩丘,长度在数十至数百公里,宽度可达数十千米,其中佛罗里达海峡北部等深岩丘长100 km,宽60 km,厚600 m,面积达3 000 km²^[12]。

2.2 MKT 组性质的判定

结合实际资料情况,本文通过以下几方面对 MKT 组性质进行判定。

1) 古地理背景

晚石炭世莫斯科期,东欧克拉通与哈萨克斯坦板块频繁碰撞,乌拉尔洋逐步闭合,滨里海盆地东南缘开始从被动大陆边缘向弧后盆地边缘转变,沉积环境以滨海台地-陆棚斜坡相交替为主^[1-2]。MKT 组沉积期(莫斯科中期),盆地东南缘发生整体沉降,水体加深,滨海台地相萎缩,陆棚斜坡相扩展至卡扎赫尔斯-比伊克扎尔隆起带以东和以南区域(图3b)。稳定延伸的斜坡带、较深的水体、远离浅水流体作用的低能环境,有利于深水牵引流作用的凸显,并在沉积过程中占据主导。

2) 岩性特征

MKT 组为厚层深灰色泥岩夹薄层细粉砂岩与灰岩,平均泥岩含量为78%,宏观上无明显的旋回性,该特征和水进退积楔岩性特征相反(正旋回、细-粉砂岩为主),与典型深水牵引流沉积岩性更为相似(图6)。

3) 地震相特征

MKT 组地震相特征与典型深水牵引流沉积相似,其内部“反向前积层”与岩性无明显的相关性,过井剖面揭示泥岩、非泥岩段均有大量前积层发育,同一前积层横向上地震相也存在明显变化,表明岩性横向上存在变化(图7)。

同时,“反向前积层”走向整体平行于古构造,呈NE-SW展布。统计表明,前积层平面分布与岩性含量无相关性,钻井显示碎屑岩与灰岩段相对发育区也多呈近NE-SW向展布,表现出受后期流体改造再分布的特征(图8)。

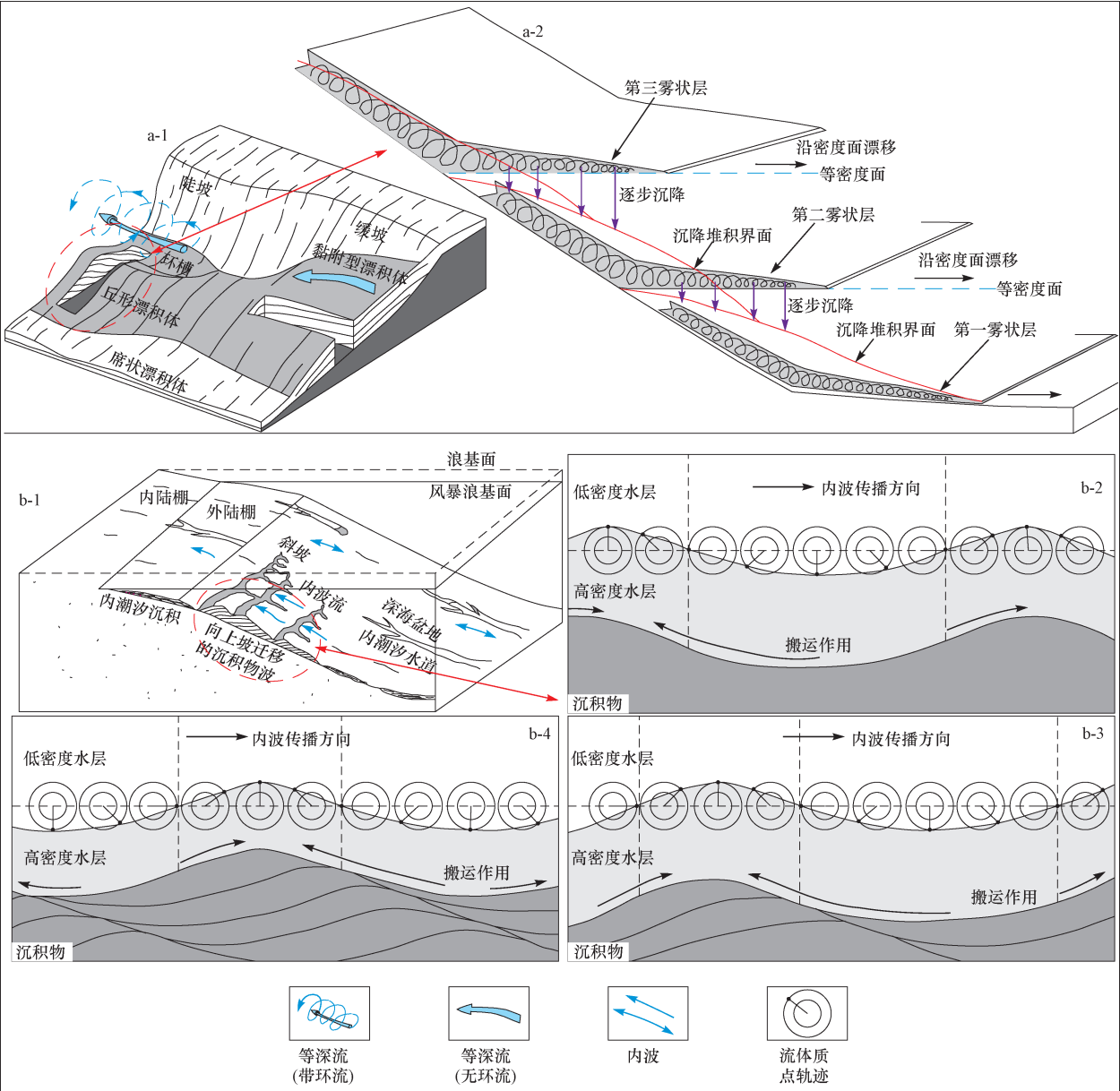


图 5 深水牵引流沉积“反向前积”形成机理

Fig. 5 Genetic mechanism of “reverse progradation” of deep water tractive current deposits
a. 等深流沉积, 据文献[10]修编; b. 内波沉积, 据文献[11]修编

4) 形态与规模

MKT 组形态上为 NE 向大型丘状沉积体的一部分,与典型深水牵引流沉积体形态上相似。在 NW 向剖面,该组表现为由西倾“反向前积层”组成的半丘状沉积体(图 7a)。在 NE 向剖面则由北向南厚度均匀减薄,内幕层系由水平逐步转变为下倾收敛(图 7b)。MKT 组发育规模较大(仅研究区面积达 2 500 km²,厚度最大近 600 m),这与深水牵引流沉积体规模相符合,而常规重力流沉积通常难以达到如此规模。

综合上述分析认为 MKT 组应属于深水牵引流沉

积,“反向前积”是沉积物向陆迁移过程中形成的沉积构型,也是深水牵引流沉积典型的沉积构型。

3 沉积演化模式

结合盆地东南缘石炭纪区域背景,本文将 MKT 组沉积演化分为 4 个阶段。

1) 初始形成阶段

KT - II 沉积后(莫斯科中期初始),盆地东南整体快速下沉,沉积相由开阔台地转为深水陆棚斜坡相(图 3b),接受泥岩沉积,西侧隆起区少量碎屑混入

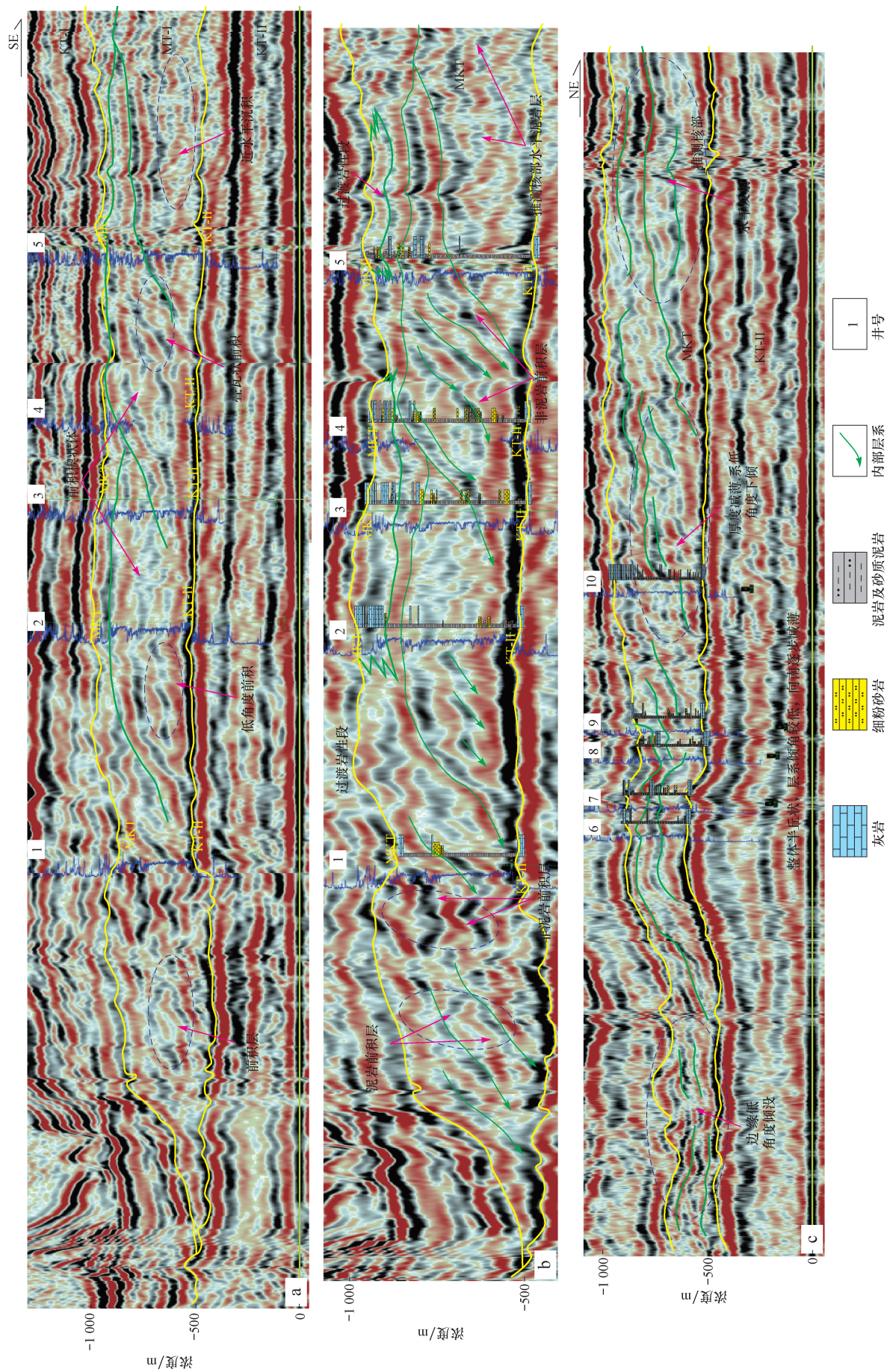


图7 滨里海盆地东南缘中区块LineX(a, b)与TraceX(c)线Visean顶拉平解释图
Fig. 7 Seismic sections with the top Visean Fm as datum along LineX (a, b) and TraceX (c) in the middle block at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

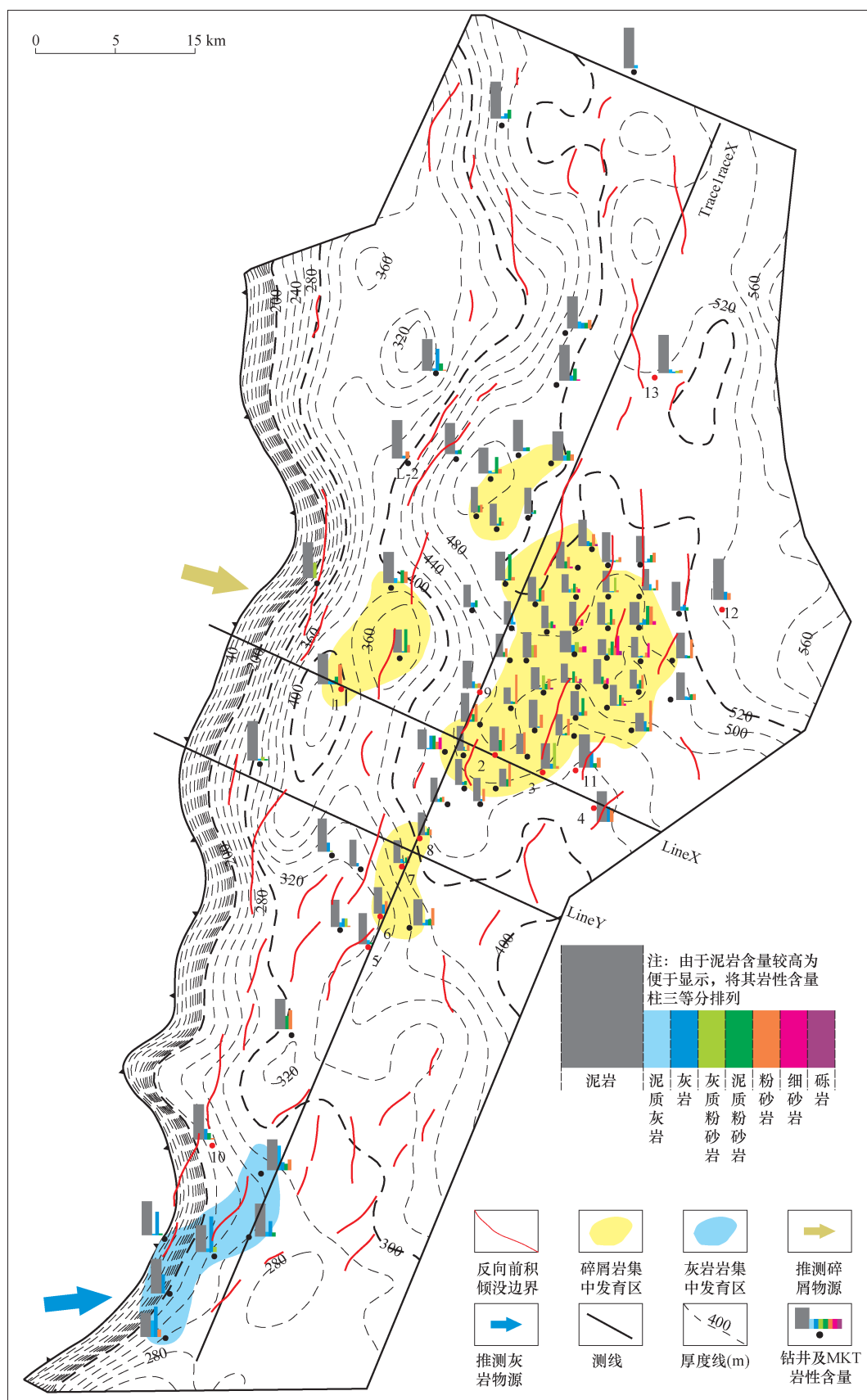


图 8 滨里海盆地东南缘 MKT 组厚度及岩性含量统计

Fig. 8 Isopach and lithologic content cartogram of the MKT Formation at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

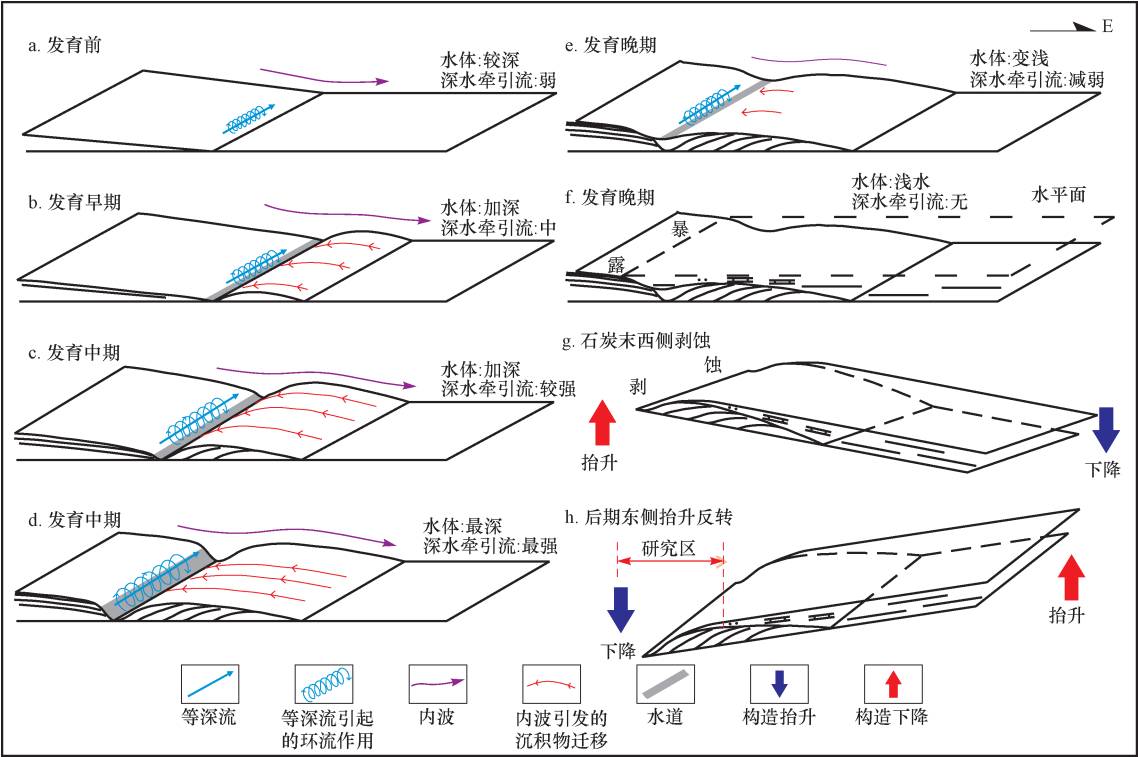


图 9 滨里海盆地东南缘中区块 MKT 组沉积演化模式

Fig. 9 Sedimentary evolution model of the MKT Formation of the middle block at the southeast margin of Pre-Caspian Basin

4 结论

1) 滨里海盆地东南缘 MKT 组是晚石炭世莫斯科中期快速水进背景下发育的深水牵引流沉积,其内部“反向前积层”是沉积物向陆迁移形成的沉积构型。该组沉积性质的确定有利于完善盆地东南缘石炭纪的沉积演化规律,为后续勘探工作扫清障碍。

2) MKT 组深水牵引流沉积的发现不仅丰富了滨里海盆地的沉积类型,也证明了其东南缘晚石炭世存在较复杂的水动力环境。

3) 目前已知的古-中生代深水牵引流沉积多为野外露头,难以从形态、规模和沉积构型等方面进行全面研究。MKT 组深水牵引流沉积的发现,为古代深水牵引流沉积研究提供了宝贵的实例,具有较高的研究价值。

4) 由于内波、等深流形成条件与环境较为一致,其对应沉积体形态上也具相似性,两类沉积作用的进一步区分更依赖于岩心、薄片资料的观察与分析。受掌握资料限制,本文仅能判定出 MKT 组属于深水牵引流沉积,而等深流、内波作用在沉积过程中主次关系的划分还有待资料的丰富与完善。

参 考 文 献

[1] 王燕琨. 滨里海盆地东缘中区块成藏机制与勘探潜力[D]. 北京:中国石油勘探开发研究院,2013.
Wang Yankun. The petroleum accumulating mechanism and exploration potential of middle block in the south edge of precaspian basin [D]. Beijing: Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 2013.

[2] R. A. Stephenson, T. Yegorova, M. F. Brunet, etc. Late palaeozoic intra- and pericratonic basins on the east european craton and its margins[J]. Geological Society London Memoirs, 2006, 32(1): 463 - 479.

[3] 胡杨, 夏斌, 王燕坤, 等. 滨里海盆地东缘构造演化及油气成藏模式分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(3): 78 - 81.
Hu Yang, Xia Bin, Wang Yankun, etc. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation model in eastern precaspian basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2014, 34(3): 78 - 81.

[4] Bruun P. Sea level rise as a cause of shore erosion[J]. Journal of Waterways Harbour Division, 1962, 88: 117 - 130.

[5] Helland Hansen, W. Gjelberg J. G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. Sedimentary Geology, 1994, 92: 31 - 452.

[6] Antonio Cattaneo, Ron J. Steel. Transgressive deposits: a review of their variability[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 62: 187 - 228.

[7] 高振中, 何幼斌. 中国油气勘探的一个新领域—深水牵引流沉积[J]. 海相油气地质, 2002, 7(4): 1 - 7.
Gao Zhenzhong, He Youbin. A new field of petroleum exploration in

- China; deep-water traction current deposits[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2002, 7(4): 1-7.
- [8] 王玉柱,王海荣,高红芳,等. 等深流作用机制和沉积的研究进展[J]. *古地理学报*, 2010, 12(2): 141-150.
- Wang Yuzhu, Wang Hairong, Gao Hongfang, et al. Contour current dynamics process and deposits: a review[J]. *Journal of Paleogeography*, 2010, 12(2): 141-150.
- [9] 高剑超,李明. 浅谈等深流及等深流沉积特征[J]. *地下水*, 2014, 36(4): 230-237.
- Gao Jianchao, Li Ming. A preliminary analysis of contour current and its character[J]. *Underground Water*, 2014, 36(4): 230-237.
- [10] J C Faugetes, T Mulder. Contour currents and contourite drifts[J]. *Developments in Sedimentology*, 2011: 150-213.
- [11] 王青春,鲍志东,贺萍. 内波沉积中指向沉积构造的形成机理[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 255-259.
- Wang Qingchun, Bao Zhidong, He Ping. The generational mechanism of orientating sedimentary structure by internal waves[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 255-259.
- [12] C S Fulthorpe, R M Carter. Continental-shelf progradation by sediment-drift accretion[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103(2): 300-309.
- [13] Jean Claude Fauge`res, Dorrik A V Stow Patrice Imbert, et al. Seismic features diagnostic of contourite drifts [J]. *Marine Geology*, 1999(162): 1-38.
- [14] 何幼斌,高振中. 塔中地区中-上奥陶统内波内潮汐沉积与油气勘探[J]. *海相油气地质*, 2002, 7(4): 33-40.
- He Youbin, Gao Zhenzhong. Middle-upper ordovician internal-wave and internal-tide deposits and their significance of petroleum geology in the central tarim basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2002, 7(4): 33-40.
- [15] 何幼斌,高振中,罗顺设,等. 陕西陇县地区平凉组三段发现内潮汐沉积[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(4): 28-33.
- He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Shunshe, etc. Discovery of internaltide deposits from the third member of pingliang formation in longxian area, shaanxi province[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(4): 28-33.
- [16] 丁海军. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流沉积[J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(1): 58-64.
- Ding Haijun. Ordovician contourites in northern helan aulacogen, northern china [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(1): 58-64.

(编辑 董立)