

文章编号: 1000-0550(2002)04-0663-05

渤海海峡潮流底应力与沉积物分布的关系^①

蒋东辉^{1,2} 高 抒²

1(中国科学院海洋研究所 山东青岛 266071)

2(南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093)

摘 要 用数值模型方法计算了渤海海峡区潮流引起的最大和平均底应力, 以及相应的活动层厚度的空间分布, 并根据沉积物参数计算了沉积物临界起动切应力。计算结果的分析表明: (1) 最大潮流底应力和沉积物临界起动切应力的关系与底质分布之间存在着明显的对应, 最大潮流底应力大于临界起动切应力的地方, 分布着粗颗粒沉积物, 若前者小于后者, 对应的是细颗粒沉积物, 若两者近于相等, 则对应着较细颗粒的沉积物; (2) 在山东半岛北部近岸和渤海海峡的东北角, 最大潮流底应力小于或接近于临界起动切应力的量值, 而对应的沉积物是粉砂和砂, 这一例外可能是由于残留沉积的出露, 这一假说需要根据全新世海面上升历史、古水动力环境模拟、渤海海峡沉积环境演化等方面的研究来验证; (3) 活动层厚度的分布规律与海底沉积物的分布存在着相关性: 即活动层厚度越大, 对应的海底沉积物越粗; 活动层厚度越小, 对应的沉积物越细。

关键词 潮流底应力 活动层厚度 沉积物分布 数值模拟 渤海海峡

第一作者简介 蒋东辉 男 1971 年出生 博士 海洋沉积动力学

中图分类号 P737 **文献标识码** A

1 引言

陆架沉积物复杂的分布格局早已被海洋地质学家所认识^[1], 总的特征是外陆架物质相对较粗, 内陆架物质相对较细。通常认为, 外陆架沉积物属于全新世海面上升之前形成的残留沉积, 尽管这些沉积部分地遭受了现代水动力的改造^[2,3]。内陆架沉积物常呈斑块状分布, 定性的观测结果表明水动力强的区域往往对应于粗颗粒的底质, 而水动力弱的区域则对应于细颗粒沉积区^[4,5]。物理海洋学家试图用数学模型方法计算出水动力的参数, 以便与底质分布作更加精细的对比。例如, 数学模型得出的潮流场被用来与河口、近岸沉积进行对比^[6-8]。

尽管研究者经常观察到水动力与沉积物的对应关系, 但例外的情形也是存在的。例如, 在只有细颗粒物质供给的区域, 水动力很强的地方仍然为粗细颗粒底质, 而在缺乏物质来源的粗颗粒残留沉积区, 很弱的水动力条件也不能造成粗细颗粒底质。这是因为, 从沉积动力学的观点来看, 一定粒径的沉积物是否发生堆积, 并不取决于水动力的强弱, 而是取决于物质输运率的空间变化^[9]。因此, 水动力与沉积物的对应关系需要更深入的解释。在渤海海峡地区, 潮流和底质分布均有显著的空间分异性, 且两者之间存在总体上的相关性^[10,11], 这为上述问题的探讨提供了一个良好的研

究区域。本文的目的是借助于潮汐数学模型, 计算渤海海峡区域潮流底应力和海底活动层厚度, 并与海底沉积物粒度参数进行对比, 进而讨论两者的相关性。

2 研究方法

利用平面二维潮汐数学模型模拟了北黄海和渤海的四个主要分潮 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 , 该模型给出了四个分潮的垂线平均流速^[12]。在此基础上, 本文计算了以年为时间尺度的最大和平均潮流底应力、海底沉积物的临界起动切应力、以及海底活动层厚度, 再将得到的结果与渤海海峡海底沉积物的分布型式进行对比。

(1) 潮流底应力计算对于水深较小的区域, 流速的垂线分布满足 Van Karman-prandtl 公式^[13]:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中 u 为距底高度 z 处的流速, u_* 为摩阻流速, κ 为 Von Karman 常数 ($=0.4$), z_0 为床底糙率或海底粗糙高度, 其取值按 Dyer^[14]。根据垂线平均流速的定义, 可对(1)式的两边进行从 z_0 至水面的积分, 从而可得到 u_* 的表达式:

$$u_* = \kappa U / \ln \frac{0.368H}{z_0} \quad (2)$$

式中 U 为垂线平均流速的合成, H 为水深。利用 1998 年 9 月 5 日~18 日在渤海海峡中部进行的 4

① 国家自然科学基金项目(批准号: 49876018)资助

收稿日期: 2001-10-29 收修改稿日期: 2002-05-18

个 ADCP 定点观测站测得的 12.5 小时垂向分层流速过程数据, 转化公式(2)是符合现场情况的^[12]。因此, 我们根据下式获得了潮流底应力:

$$\tau = \rho u_*^2 (\rho \text{ 为海水密度, 取 } 1026.8 \text{ kg/m}^3)。$$

(2) 临界起动切应力计算

利用 Dyer 给出适合于海洋环境的沉积物起动临界摩阻流速的公式^[14]:

$$u_{*c} = 7.0 D_{50}^{0.2} \quad (3)$$

得到沉积物临界起动剪切应力的计算公式为:

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 = \rho (7.0 D_{50}^{0.2})^2 = 49.0 \rho D_{50}^{0.4} \quad (4)$$

式中 τ_c 为沉积物临界起动切应力, u_{*c} 为沉积物起动临界摩阻流速, D_{50} 是沉积物的中值粒径。

(3) 海底活动层厚度计算

活动层厚度曾被表示为沙波高度的函数, 在无沙波的情况下为水深和粒径的函数^[15]。Nierkerk 等^[16]根据海底活动层对水流的敏感度实验, 把活动层厚度 T_a 表示为底应力的函数, 使之具有了明确的物理意义, 并与野外观测更为符合:

$$T_a = 2D_{50} \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad (5)$$

式中 τ 为潮流底应力。本文采用(5)式计算海底活动层厚度。

3 计算结果

3.1 潮流底应力与海底沉积物的分布

最大潮流底应力与沉积物临界起动底应力分布的对比如图 1 所示: 最大潮流底应力在老铁山水道达到最大值, 为 5 N m^{-2} ; 在山东半岛北侧烟台附近达到其

最小值, 为 0.25 N m^{-2} 。在海峡的西部和辽东半岛南部大连沿岸, 底应力较高, 约为 1 N m^{-2} ; 仅次于老铁山水道的另一个高值区在成山头附近, 为 3 N m^{-2} 。渤海海峡东部的北黄海中部泥区, 其值为 $0.3 \sim 0.5 \text{ N m}^{-2}$ 的低值区。

海底沉积物临界起动底应力的最大值在老铁山水道, 为 0.9 N m^{-2} , 其最小值对应于北黄海中部泥, 约为 0.3 N m^{-2} 。在海峡的西部临界起动底应力从南到北逐渐增大, 为 $0.4 \sim 0.9 \text{ N m}^{-2}$; 在辽东半岛南部大连沿岸为 $0.5 \sim 1 \text{ N m}^{-2}$; 在成山头附近为 0.5 N m^{-2} 左右。

渤海海峡海底沉积物类型分布如图 2 所示, 与图 1 加以对比可以看出, 北黄海中部泥区的最大潮流底应力小于或等于临界起动切应力, 这意味着沉积物基本上处于静止状态。在平静天气下, 细颗粒沉积物在这里保持连续沉积, 只有特大风暴潮或特大风浪等突发性事件发生时才可能发生再悬浮。在老铁山水道附近, 最大潮流底应力的量值 (5 N m^{-2}) 远大于这里的沉积物的临界起动值 (0.9 N m^{-2}), 因而, 属于强冲刷区, 底质为石英岩、花岗岩砾石, 并有基岩出露^[17]。在海峡的西部, 最大潮流底应力略大于沉积物的临界起动值, 对应的沉积物为粉砂一砂; 由于海底冲刷作用, 在庙岛群岛附近局部有硬粘土出露。在大连沿岸, 最大潮流底应力略大于临界起动切应力, 与其对应的海底沉积物为砂质沉积物; 在该区南侧, 最大潮流底应力过渡为与临界起动切应力量值相当, 对应的沉积物为粉砂。再往南是渤海海峡中部泥区所在, 最大潮流底

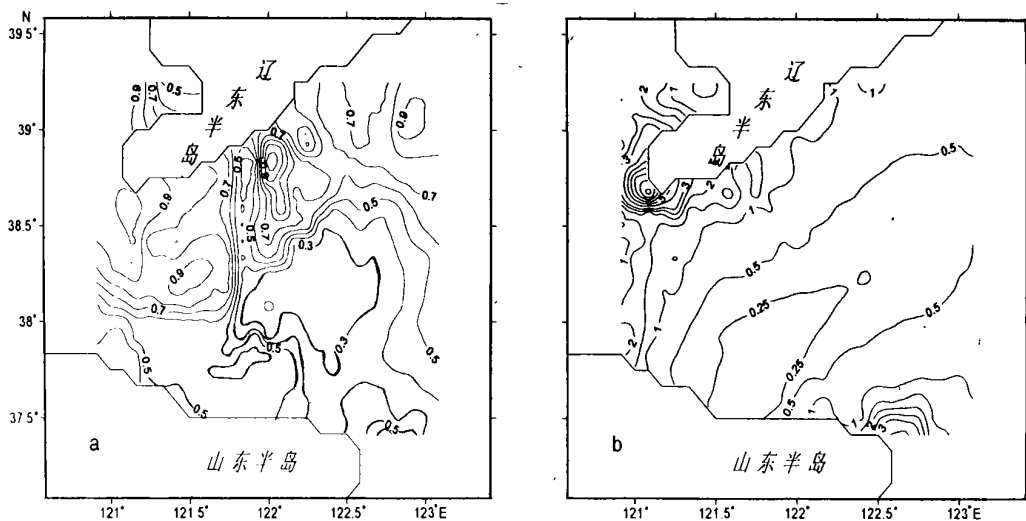


图 1 最大潮流底应力(a)和沉积物临界起动切应力(b)分布图(单位: N m^{-2})

Fig. 1 Distribution of maximum tidally-induced near-bed shear stress (a) and critical shear stress for sediment motion (b) (in N m^{-2})

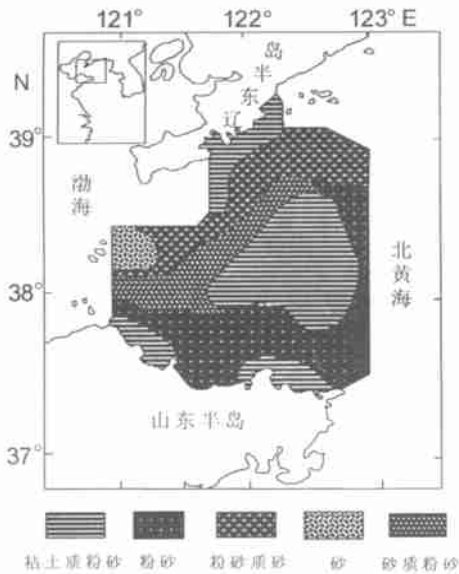


图2 渤海海峡海底沉积物类型分布图(据文献〔19〕)

Fig. 2 Distribution of surficial sediments in the Bohai Strait

应力不超过临界起动切应力,底质为细颗粒沉积。大连沿岸狭长泥带的水动力特征与中部泥相近。成山头附近,最大潮流底应力的量值相对于沉积物的临界起动切应力值也非常大,为冲刷区,对应的沉积物为粉砂。

上述特征的一个例外是,在山东半岛北部近岸和渤海海峡的东北角,最大潮流底应力小于或接近于临界起动切应力的量值,对应的沉积物应该是细颗粒沉积物,但是这里的海底沉积物实际上是粉砂和粉砂质砂。其原因可能是,在全新世海面上升过程中,这些区域一度有较强的水动力,而且由于黄河当时在渤海海峡附近入海,因而广泛形成了粉砂质沉积;全新世高海面时期,水动力和黄河入海口位置均发生了改变,因此粉砂质沉积作为残留沉积而保留下来。当然,上述假说需要根据全新世海面上升历史、古水动力环境模拟、渤海海峡沉积环境演化〔18〕等方面的深入研究来加以验证。

以上结果表明,最大潮流底应力(代表水动力的强弱)和沉积物临界起动切应力(代表海底沉积物的动力学特征)之间的关系与海底沉积物的分布存在着明显的对应:一般来说,最大潮流底应力大于临界起动切应力的地方,分布着粗颗粒沉积物;若前者小于后者,对应的是细颗粒沉积物;若两者近于相等,则对应着较细颗粒的沉积物。

平均底应力分布(图3)与最大潮流底应力的分布具有相同的特征:老铁山水道附近为最大值所在(为 1 N m^{-2}),其次为成山头附近(为 0.6 N m^{-2});最小值

在山东半岛北部近岸($< 0.05 \text{ N m}^{-2}$);北黄海中部泥区,平均底应力约为 $0.1 \sim 0.15 \text{ N m}^{-2}$;辽东半岛南部沿岸平均底应力为 $0.2 \sim 0.3 \text{ N m}^{-2}$ 。可以看到,平均底应力的分布与海底沉积物的分布也对应良好,即平均底应力越大,对应的海底沉积物越粗,反之则越细。

3.2 活动层厚度与海底沉积物的分布

活动层厚度的量值与海底沉积物的类型以及水动力条件有关,它能反映出水动力和沉积物的活动性的强弱。对应于最大底应力的活动层厚度的分布(图4a)也与海底沉积物的分布也存在良好的对应关系。对照图2可以看出,在强潮流区老铁山水道,活动层厚度高达 6 mm ,这里正是基岩和砾石出露的地方,其次是成山头(约为 1.2 mm),对应的海底沉积物为粉砂;辽东半岛南部沿岸以及海峡的西部,也是沉积物活动性很强的区域(约为 $1.2 \sim 2.4 \text{ mm}$),对应的沉积物为砂;北黄海中部泥区活动层厚度小于 0.8 mm ,这里水动力非常弱,沉积物活动性能很低,与这里泥质沉积区相对应;此外,在山东半岛北部近岸,活动层厚度约为 0.4 mm ,沉积物为粉砂。

与平均底应力相应的活动层厚度分布(图4b)具有相同的特征:老铁山水道附近为其最大值所在(约为 4 mm),其次为成山头附近(为 0.8 mm);最小值在山东半岛北部近岸和北黄海中部泥区,平均活动层厚度约为 0.2 mm ;辽东半岛南部沿岸活动层厚度为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。

活动层厚度的分布规律与海底沉积物的分布存在着相关性:即活动层厚度越大,对应的海底沉积物越粗;活动层厚度越小,对应的沉积物越细。

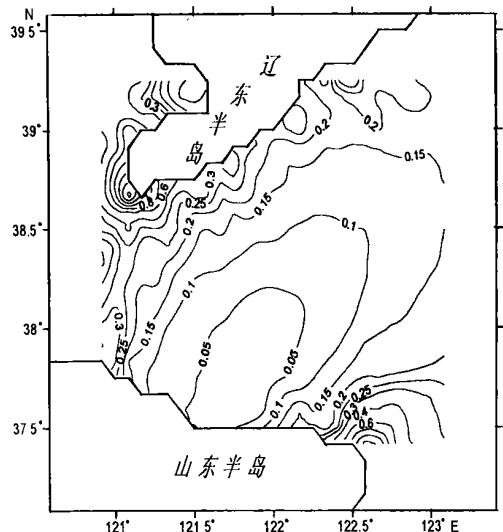


图3 平均底应力分布图(单位: N m^{-2})

Fig. 3 Distribution of mean near-bed shear stress (in N m^{-2})

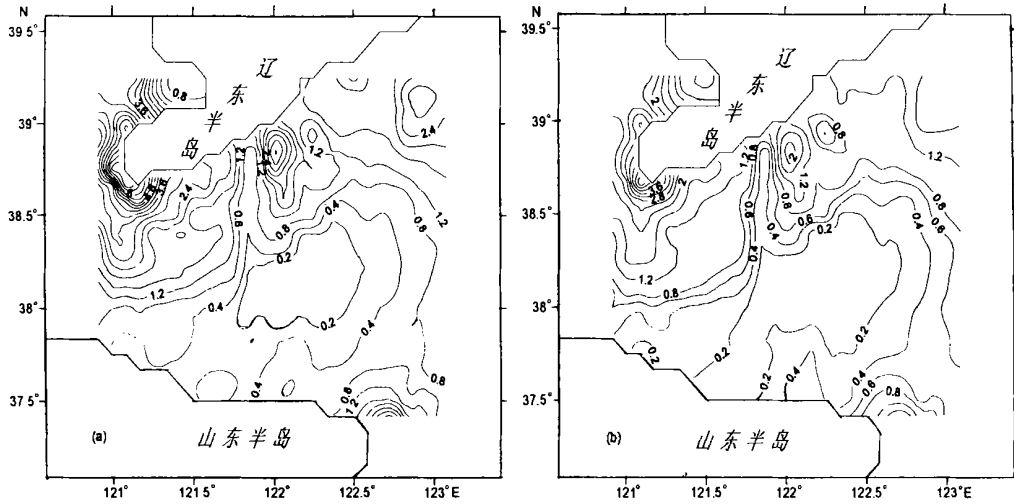


图4 活动层厚度分布图: (a) 对应于最大底应力; (b) 对应于平均底应力(单位: mm)

Fig. 4 Distribution of the thickness of mobile layer (in mm) in response to maximum (a) and mean (b) near-bed shear stresses

4 结语

本文计算了渤海海峡区潮流最大和平均底应力、沉积物临界起动切应力以及活动层厚度的空间分布。结果表明:

(1) 潮流底应力的高值区在老铁山水道, 次高值区在成山头, 再次为辽东半岛南部沿岸和海峡西部的庙岛群岛附近, 对应于北黄海中部泥区潮流底应力最弱。最大潮流底应力(代表水动力的强弱)和沉积物临界起动切应力(代表海底沉积物的动力学特征)之间的关系与海底沉积物的分布存在着明显的对应: 最大潮流底应力大于临界起动切应力的地方, 分布着粗颗粒沉积物; 若前者小于后者, 对应的是细颗粒沉积物; 若两者近于相等, 则对应着较细颗粒的沉积物。

(2) 上述特征的一个例外是, 在山东半岛北部近岸和渤海海峡的东北角, 最大潮流底应力小于或接近于临界起动切应力的量值, 而对应的沉积物是粉砂和砂, 该处推测是残留沉积出露区。这一上述假说需要根据全新世海面上升历史、古水动力环境模拟、渤海海峡沉积环境演化等方面的深入研究来加以验证。

(3) 活动层厚度的分布规律与海底沉积物的分布存在着相关性: 即活动层厚度越大, 对应的海底沉积物越粗; 活动层厚度越小, 对应的沉积物越细。

参考文献(References)

1 Shepard F P. Submarine Geology (2nd edition)[M]. New York: Harper and Row, 1963. 557

2 Emery K O. Relict sediments on continental shelves of the world[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1968, 52: 445~464

3 Swift D J P, Stanley D J, Curran J R. Relict sediments on continental shelves: a reconsideration[J]. Journal of Geology, 1971, 79: 322~346

4 Allen G P. Relationship between grain size parameter distribution and current patterns in the Gironde Estuary (France)[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41: 74~88

5 Grochowski N T L, Collins M B, Boxall S R, Salomon J-C. Sediment transport predictions for the English Channel, using numerical models [J]. Journal of the Geological Society (London), 1993, 150: 683~695

6 许卫忆, 苏纪兰. 杭州湾二维潮波计算及底质分布的动力成因[J]. 海洋学报, 1986, 17: 493~503 [Xu Wei, Su Jilan. Calculation of two-dimensional tide wave and dynamic formation of surficial sediments' s distribution within Hanzhou Bay [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 17: 493~503]

7 董礼先, 苏纪兰, 王康. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系 [J]. 海洋学报 1989, 11(1): 102~114 [Dong Lixian, Su Jianlan, Wang Kangshan. Tidal current field and it' s effecton on sediment transport within Yellow sea and Bohai sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(1): 102~114]

8 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 雷方辉. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466~472 [Zhao Baoren, Zhuang Guowen, Cao Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai sea [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466~472]

9 Dronkers J, Miltenburg A G. Fine sediment deposits in shelf seas [J]. Journal of Marine System, 1996, 7: 119~131

10 刘振夏. 黄海表层沉积物的分布规律 [J]. 海洋通报, 1982, 1(1): 43~51 [Liu Zhenxia. Distribution patterns of surficial sediments in Yellow sea [J]. Marine Science Bulletin, 1982, 1(1): 43~51]

11 尹延鸿, 周青伟. 渤海东部地区沉积物类型特征及分布规律 [J].

- 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 47~54 [Yin Yanhong, Zhou Qingwei. Characteristics and distribution of sediment types in eastern Bohai sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(2): 47~54]
- 12 蒋东辉, 高抒, 程鹏. 渤海海峡沉积物输运的数值模拟 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 553~561 [Jiang Donghui, Gao Shu, Cheng Peng. Modelling sediment transport in the Bohai Strait [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2002 33(5): 553~561]
- 13 Fang G, Ichiye T. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1983, 73(1): 65~82
- 14 Dyer K R. Coastal and estuarine sediment dynamics [M]. New York: John Wiley, 1986
- 15 Rahuel J L, Holly Fm, Belleudy J P, Yang G. Modeling of Riverbed evolution for bedload sediment mixture [J]. J. Hydraulic Engineering, 1989, 115: 1 521~1 542
- 16 Niekerk A V, Voegel K R, Slingerland R L, Brige J S. Routing of heterogeneous sediment over movement bed: Model Development [J]. J. Hydraulic Engineering, 1992, 118: 246~262
- 17 秦蕴珊, 赵一阳等主编. 渤海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1985 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, Zhao Songling. Geology of Bohai Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990. 98~105]
- 18 Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. Geo-Marine Letters 2002, 21: 212~218
- 19 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物粒度特征和净输运趋势 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604~615 [Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow sea, based upon grain size trend analysis [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica 2000, 31(6): 604~615]

Relationship between the Tidally-induced Near-bed Shear Stress and the Distribution of Surficial Sediments in the Bohai Strait

JIANG Dong-hui^{1, 2} GAO Shu²

1(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong 266071)

2(Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract A 2-D horizontal numerical model is used to simulate maximum and mean tidally-induced near-bed shear stresses and the corresponding mobile layer thicknesses in the Bohai Strait region. At the same time, the critical near-bed shear stress was calculated using the grain size parameters. An analysis of the results shows that: (1) the seabed sediment types are related to the difference between the tidally-induced shear stress and the critical shear stress (a larger difference is associated with a coarser bed material); (2) in some places (e.g. the northeastern part of the Strait and the near-shore areas of the northern Shandong Peninsula) the tidally-induced shear stress is smaller than the critical shear stress, but the seabed sediment is relatively coarse, indicating that the sediment may represent relict materials (this hypothesis should be tested by the results from future investigations into the Holocene sea level changes, paleo-hydrodynamic conditions and the evolution of the sedimentary environment); and (3) a good correlation between the mobile layer thickness and the sediment type exists, i.e., a large mobile layer thickness is associated with relatively coarse sediments, and a small thickness is associated with fine-grained sediments.

Key words tidally-induced near-bed shear stress, thickness of mobile layer, distribution of surficial sediments, numerical modelling, Bohai Strait