



淤泥质海岸环境沙滩存在原因分析 ——以连云港天然沙滩为例

张磊^{1,2,3}, 徐岢^{1,2,3}, 韩雪健^{1,2,3}, 华夏^{1,2,3}, 郭相臣^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029;
3. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210024)

摘要: 基于连云港淤泥质海岸存在的4处天然沙滩, 对沙滩平面和剖面形态特征、潮流条件、波浪条件以及泥沙运动特征进行详细分析, 以研究淤泥质海岸环境存在沙质沙滩的原因。结果表明: 天然沙滩均为两端有岬角的内凹弧形地貌形态, 主要来浪方向与湾口方向一致, 不利于产生显著的沿岸输沙, 避免沙滩沙流失; 剖面具有明显转折特征, 较大的前沿水深有利于减少外海波浪传播过程中的损耗, 可以维持较大的滩前波浪动力条件; 来浪方向中大浪要达到一定的集中度和频率, $H_{1/10}$ 波高大于0.40 m的大浪维持在36.6%以上的沙滩才能具备较好的沙滩滩面特征; 波浪是淤泥起动悬扬的主要动力因素, 波流挟沙力大于背景含沙量有利于沙滩形成, 且挟沙力越大沙滩宽度越大。

关键词: 淤泥质海岸; 天然沙滩; 波浪动力条件; 泥沙运动

中图分类号: U652; P753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0051-07

Analysis on causes of sandy beach in muddy coastal environment: a case of natural sandy beaches in Lianyungang

ZHANG Lei^{1,2,3}, XU Ke^{1,2,3}, HAN Xuejian^{1,2,3}, HUA Xia^{1,2,3}, GUO Xiangchen^{1,2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering, MOT, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on four natural sandy beaches in Lianyungang muddy coast, this study analyzes the morphological characteristics of beach plane and profile, tidal current conditions, wave conditions and sediment movement characteristics to study the reasons for the existence of sandy beaches in muddy coast environment. The results show that the natural beaches are concave arc-shaped landforms with headlands at both ends, and the main direction of the incoming waves is consistent with the direction of the bay mouth, which is not conducive to significant coastal sediment transport and avoids sediment loss. The natural beach profile has obvious turning characteristics, and the larger front water depth is conducive to reducing loss during the propagation of offshore waves, which can maintain larger wave dynamic conditions in front of the beach. The large waves in the direction of the natural beach should reach a certain concentration and frequency, and the large waves of the beach with $H_{1/10}$ wave height greater than 0.40 m accounting for more than 36.6% is conducive to better beach surface characteristics. Waves are the main driving force of the mud resuspension. The sand carrying capacity of the tidal current is greater than the background sand concentration, which is conducive to the formation of the beach, and the larger the sand carrying capacity, the wider the beach width.

Keywords: muddy coast; natural beach; wave current dynamic condition; sediment movement

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 张磊 (1977—), 男, 教授级高级工程师, 从事海洋水动力及泥沙运动方面研究。

我国淤泥质海岸分布广泛,约占全国岸线总长度的 $1/4$ ^[1]。相较而言,我国沙质海岸区段相对较少,但为满足沿海旺盛的旅游休闲需求,近年来逐渐流行人工沙滩的建造。针对人工沙滩的研究较为丰富,黄哲等^[2]对波浪作用下的人工沙滩剖面横向输沙进行试验研究,分析不同水位及波浪条件下人工沙滩剖面的形态变化,并得出了形成稳定剖面形态所需要的条件;谭忠华等^[3]对人工沙滩在堤后次生波作用下的稳定性进行试验研究,分析了不同水位条件、不同重现期的波浪作用下,斯里兰卡科伦坡港口复坡和单坡2种不同坡度人工沙滩的冲淤情况及稳定性;孙连成^[4]利用整体潮流泥沙物理模型及波浪水槽模型对天津港东海岸人工沙滩的冲淤情况进行了试验研究。

从旅游景观角度看,淤泥质海岸比沙质海岸逊色很多,但在淤泥质海岸环境中也可能零星存在一些天然沙质沙滩,如连云港部分海岸的沙质沙滩处于外海淤泥质海岸环境包围中,沙滩沙质完好。淤泥质海岸环境能存在沙质沙滩一定具有普遍的共性条件,值得研究探讨。对于淤泥质海岸沙滩存在条件,黄世昌等^[5]研究了浙江淤泥质海岸的沙滩,得到沙滩基本存在于岬角海湾内,沙滩剖面为 $1/15\sim 1/30$ 。解鸣晓等^[6]提出在淤泥质海岸建设人工沙滩的要求是沙滩岸线为静态岬湾岸线形态,沙滩坡度符合平衡剖面。目前研究大多认为淤泥质海岸沙滩存在于岬角海湾内,且具有一定的波浪强度。上述研究并未详细说明淤泥质海岸岬角海湾存在沙滩的机理,也未有海岸动力强度的具体要求。因此本文基于连云港海域的自然条件,对沙滩的平面剖面形态特征、潮流条件、波浪条件及泥沙运动特征进行详细分析,得到了淤泥质海岸沙滩存在的一般条件,旨在为淤泥质海岸人工沙滩的规划设计提供更充分的理论依据。

1 研究海域自然条件

研究区域位于连云港港区及临近岸段,同时地处海州湾湾顶偏南,近岸海域属于南黄海海域。

海州湾为开敞型海湾,是我国南北海岸的过渡带。公元1128—1855年黄河在江苏北部夺淮入海期间,由于丰富的泥沙来源、河流的冲积作用以及海岸沿岸流输运的影响,海州湾迅速向海淤长;公元1855年黄河北归渤海后,泥沙供应骤减,部分岸段开始侵蚀,海湾的岸滩演变进入复杂的重新塑造过程^[7]。目前,海州湾的海岸地貌形态多样,由北向南可以分为4个部分:绣针河口—兴庄河口为侵蚀型沙质海岸;兴庄河口—西墅为淤长型淤泥质海岸;西墅—烧香河口(包括东西连岛)为基岩海岸;烧香河口—灌河口为后退型淤泥质海岸^[8]。研究区域属于西墅—烧香河口的基岩海岸,范围较小并处于广阔的淤泥质海岸环境中。

研究区域海域潮汐属正规半日潮性质。本文高程系统采用当地理论最低潮面(1985国家高程基准以下2.9 m)为基准,对连云港潮位站多年潮位观测资料进行统计可知,平均海平面为2.94 m,平均潮差为3.39 m,最大潮差为6.48 m。潮流属正规半日潮流性质,外海受黄海逆时针潮波系统控制为旋转流流态,近岸受地形影响为垂岸(SW—NE向)的往复流,潮流流速由北向南、由近岸向外海逐渐减小,涨潮流速一般大于落潮流速。波浪的常浪向为NE向,频率为26.41%,E向出现频率次之为18.40%;强浪向为偏北向,波高1.5 m以上出现频率最高的为NNE向,频率为2.13%,NE向出现频率次之为1.79%^[9]。

根据沉积物粒度参数分析,研究区域沉积物粒度总体上表现出“近岸细、远岸粗”的空间分布规律。近岸主要为大于0.031 mm的黏土质粉砂,远岸为小于0.125 mm的细砂,中间为粉砂质砂和砂质粉砂^[10]。研究区域海域含沙量具有明显的季节性变化特征,即冬半年含沙量整体高于夏半年,与波高年内变化特征基本一致;含沙量同样受潮型影响显著,大潮含沙量高于小潮;海域年平均含沙量约为 0.22 kg/m^3 ^[11]。海州湾存在两股强度不同、物质成分明显差异的泥沙流,即来自北侧岚山头方向的沙流和南侧废黄河口一带的泥流,最终向海州湾湾顶汇合^[12]。由于近年来苏北海岸

大规模海岸工程的建设,尤其是连云港港区西大堤的建设,改变了港区内水动力与沉积环境,阻碍了泥沙流沿岸输运。港湾内泥沙淤积,在西大堤内侧形成新的潮滩,位于湾顶的墟沟沙滩严重淤积;由于西大堤封堵了连云港西口门,使得近岸泥沙的运移路径改变,北部的泥沙流自海州湾东去沿大堤折向东西连岛方向,在大堤的外侧和东西连岛外缘形成新的落淤场所^[13]。

2 天然沙滩概况

连云港港区及临近岸段曾经存在5个天然沙滩,分别为西墅、墟沟、大沙湾、苏马湾、黄窝沙滩,位置分布见图1。西墅沙滩位于基岩海岸最西端与淤泥质海岸交汇处,由于岸外竹岛阻挡和西大堤的建设,西墅沙滩附近动力条件相对较弱,沙滩外侧淤泥质浅滩宽广,沙滩出现泥化,曾经一度废弃,2014年实施沙滩修复整治工程后,沙

滩环境有所恢复。墟沟沙滩原为优质的天然沙滩,西大堤建成后湾内淤积严重、水质状况恶化、沙滩泥化,20世纪90年代末逐渐废弃,2006年进行整治改造成为在海一方公园,海滩生态得到一定恢复,但近年来沙滩又快速淤积,环境问题依然存在。大沙湾和苏马湾沙滩位于东西连岛外海侧,沙滩质量高,目前是连岛海滨浴场。黄窝沙滩位于连云区港区出口右侧,直接面向外海,沙质较好,因围填工程目前该沙滩已经不复存在。

研究区域处于广阔的淤泥质海岸环境中,存在天然沙滩必然存在的原因,本文从沙滩的形态特征、波浪动力、潮流动力和泥沙运动这4个方面探讨淤泥质海岸存在天然沙滩的一般条件。由于墟沟沙滩受西大堤影响显著,其动力泥沙条件变化剧烈,且缺少该处相关资料,因此分析中不作考虑。



图1 连云港天然沙滩位置

Fig. 1 Location of natural beaches in Lianyungang

3 天然沙滩存在原因

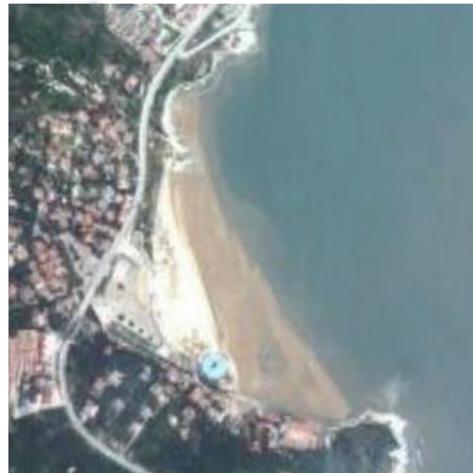
3.1 形态特征

对4个天然沙滩的平面形态进行比较分析,见图2,可知其具有相似特征:沙滩均处于内凹弧形海湾内,海湾两端前伸为岬角地貌,属于岬湾

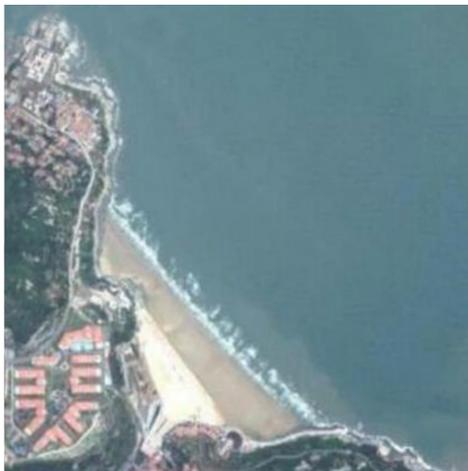
海滩^[14-15]。在岬角处,波向线集中发生辐聚,高波能产生强烈冲刷;而在湾内,波向线分散发生辐散,低波能有利于海滩沙汇集,且海滩岸线与内凹弧形波峰线平行。



a) 西墅沙滩



d) 黄窝沙滩



b) 大沙湾沙滩



c) 苏马湾沙滩

图 2 天然沙滩平面形态

Fig. 2 Plane shape of natural beaches

对天然沙滩中轴线处的剖面地形进行分析，见图 3，4 处沙滩坡度均表现出近岸陡、远岸缓的特征，且由于沙泥分界线的存在均有明显转折特征。近岸沙滩坡度约为 1/40，远岸沉积物较细坡度约为 1/1 600。大沙湾、苏马湾、黄窝 3 处天然优质沙滩离岸 500 m 以外滩面高程基本均在 -2 m 以下，表明沙滩前沿水深较大。西墅沙滩由于西大堤的建设阻碍了原来连云海峡的沿岸输沙，沙滩发生了严重淤积，其剖面高程整体比其他海滩高 3 m 以上，沙滩宽度也明显较窄。

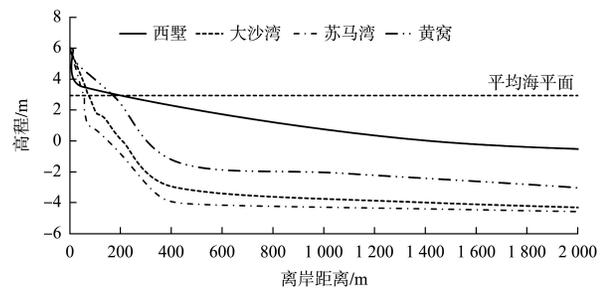


图 3 天然沙滩剖面地形曲线

Fig. 3 Topographic curve of natural beaches profile

3.2 潮流动力

研究海域涨潮时外海潮流向岸运动,落潮时返回深水区,潮流往复流特征明显^[16]。根据数模计算结果绘制各沙滩中轴线全潮平均流速沿程分布情况,见图4。可知从深水区到近岸区,潮流最大流速不断减少,其最大流速值从0.55 m/s渐变到近岸0.20 m/s以下。沙滩前沿500 m内流速较小,基本在0.30 m/s以内,500~1 500 m内流速为0.20~0.55 m/s。500 m外流速总体上大沙湾>苏马湾>黄窝>西墅,西墅沙滩由于水深较浅,前方2 000 m内流速都在0.30 m/s以内。

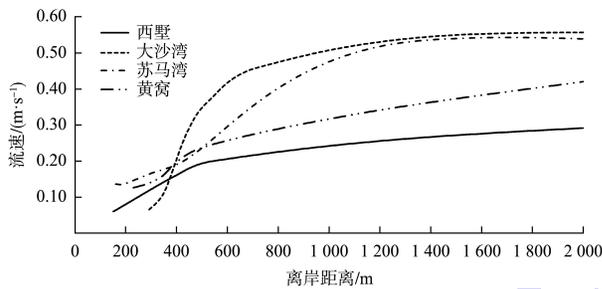


图4 全潮平均流速垂岸分布

Fig. 4 Average velocity of full tidal cycle in cross-shore direction

3.3 波浪动力

统计4处海滩的 $H_{1/10}$ 波浪特征见表1。大沙湾、苏马湾沙滩内凹海湾来浪方向在NNW—ESE之间,所占波浪频率为81.6%,大于0.40 m波浪所占频率为40.8%,且内凹海湾口门方向正对NE向,即绝大部分波浪能直接传播到沙滩上;黄窝沙滩内凹海湾来浪方向在NNE—SE之间,所占波浪频率为75.8%,大于0.40 m波浪所占频率为36.6%,内凹海湾口门方向正对ENE向,即大部分波浪也能直接传播到沙滩上;西墅沙滩内凹海湾来浪方向为NW—NNE和ENE,所占波浪频率为33.5%,大于0.40 m波浪所占频率为20.7%,仅少部分波浪能直接传播到沙滩上。

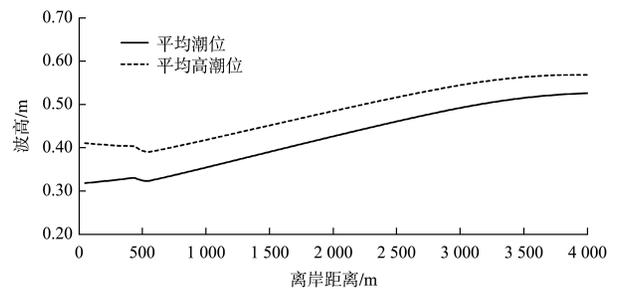
结合波浪动力和沙滩平面形态特征可知,优质的天然沙滩来浪方向要与岬湾海口门方向基本一致,且波浪须达到一定的集中度和频率,大于0.40 m大浪维持在36.6%以上。

表1 沙滩 $H_{1/10}$ 波浪特征

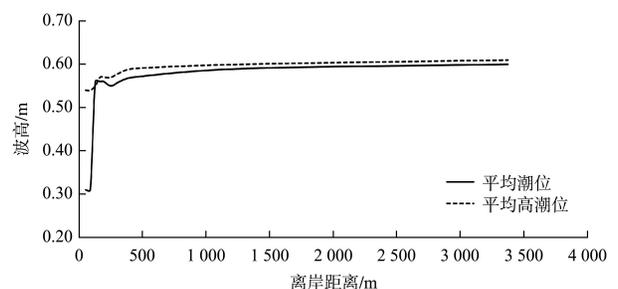
Tab. 1 $H_{1/10}$ wave characteristics

沙滩名称	口门方向	来浪方向	来浪频率/%	$H_{1/10} > 0.40$ m波浪所占频率/%
西墅	NNE	NW—NNE, ENE	33.5	20.7
大沙湾	NE	NNW—ESE	81.6	40.8
苏马湾	NE	NNW—ESE	81.6	40.8
黄窝	ENE	NNE—SE	75.8	36.6

根据数模计算结果绘制的各沙滩中轴线处平均潮位和平均高潮位情况下的波高垂岸分布见图5。西墅沙滩波浪从外海传播到近岸200 m过程中,波浪损耗较大,潮位对波浪大小影响显著,平均潮位与平均高潮位外海4 000 m处波浪相差近1.00 m,平均潮位时近岸200 m破碎前波高约为0.33 m,平均高潮位时近岸200 m破碎前波高约为0.40 m,见图5a)。大沙湾和苏马湾沙滩地理位置接近,3 000 m外海波浪条件相同,波浪从外海传播到近岸200 m过程中,波浪损耗小,潮位对波浪大小影响较小,大沙湾近岸200 m时波高为0.58~0.60 m,苏马湾近岸200 m时波高为0.54~0.56 m,随后破碎,见图5b)、c)。黄窝沙滩波浪从外海传播到近岸200 m过程中,波浪损耗不大,潮位明显影响波浪传播过程大小,平均潮位与平均高潮位外海4 000 m处波浪相差近1.00 m,平均潮位时近岸200 m破碎前波高约为0.45 m,见图5d)。



a) 西墅沙滩



b) 大沙湾沙滩

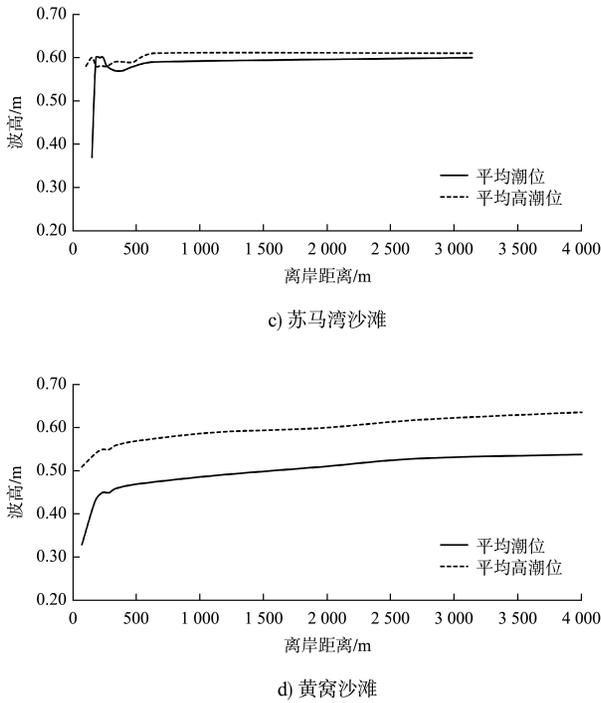


图 5 4 处天然沙滩波高垂岸分布
 Fig. 5 Wave height of four natural beaches in cross-shore direction

总体上，沙滩前较大水深利于减少外海波浪传播过程中的损耗，波浪传播到潮间带低潮位处才能保持较大的波浪强度。

3.4 泥沙运动

为探究 4 处天然沙滩的泥沙运动规律，采用窦国仁^[17]波浪和潮流的挟沙力公式计算各沙滩中轴线处波流、纯浪和纯流作用下挟沙力沿程分布，见图 6。在当地泥质海床环境条件下，计算结果可以衡量波流动力对近岸滩面上细颗粒泥沙的再悬浮能力。

比较波流、纯浪和纯流作用下挟沙力沿程分布可知，纯浪挟沙力远大于纯流挟沙力，量值约大一个数量级，且纯浪挟沙力呈远岸小近岸大的特征，纯流挟沙力则为远岸大近岸小的特征。因此，研究区域波浪动力为沙滩上淤泥起动悬浮的主要动力因素。

4 处沙滩在远岸(500 m 外)的波流挟沙力基本为 0.20 kg/m^3 ，与研究区域实测近岸年平均含沙量 0.22 kg/m^3 相当，表明滩面冲淤基本平衡。由于来浪方向基本与岬湾海滩口门方向一致，潮流为垂岸的往复流，因此沙滩难以形成稳定的沿岸输沙，且远岸基本冲淤平衡，因此湾内形成相对

独立的泥沙单元。湾内(500 m 内)大沙湾、苏马湾、黄窝沙滩挟沙力急剧增大，挟沙能力显著增强，细颗粒泥沙不易落淤，有利于优质沙滩形成；西墅沙滩挟沙力增幅相比其他沙滩较小，其挟沙能力较弱，沙滩宽度最小。因此，波流挟沙力大于背景含沙量，有利于沙滩形成，且挟沙力越大沙滩宽度越大。

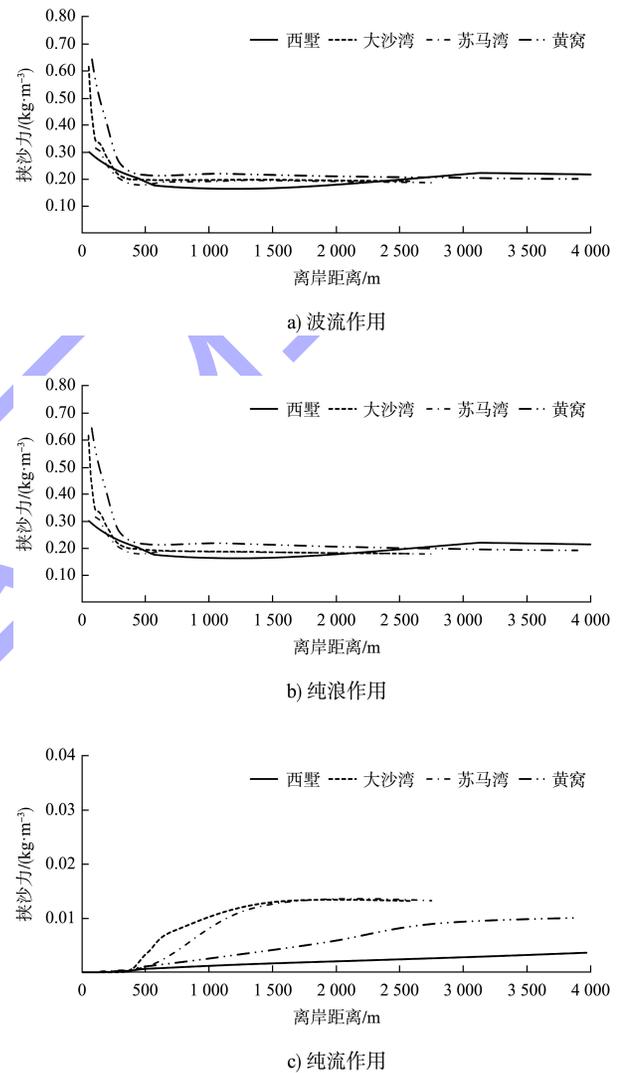


图 6 不同工况作用下的挟沙力垂岸分布
 Fig. 6 Sediment carrying capacity under different working conditions in cross-shore direction

4 结论

- 1) 天然沙滩均为两端有岬角的内凹弧形地貌形态，主要来浪方向与湾口方向一致，不利于产生显著的沿岸输沙，避免沙滩沙粒流失。
- 2) 天然沙滩剖面具有明显转折特征，较大的前沿水深有利于减少外海波浪传播过程中的损耗，

可以维持较大的滩前波浪动力条件。

3) 天然沙滩来浪方向中大浪要达到一定的集中度和频率, $H_{1/10}$ 波高大于 0.40 m 的大浪维持在 36.6% 以上的沙滩才能具备较好的沙滩滩面特征。

4) 天然沙滩海域潮流的挟沙力很小, 波浪才是淤泥起动悬扬的主要动力因素。波流挟沙力大于背景含沙量有利于沙滩形成, 且挟沙力越大沙滩宽度越大。

参考文献:

- [1] 严恺, 梁其苟. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
YAN K, LIANG Q X. Coastal engineering [M]. Beijing: China Ocean Press, 2002.
- [2] 黄哲, 琚烈红, 冯卫兵. 波浪作用下人工沙滩剖面横向输沙试验研究[J]. 水运工程, 2018(3): 28-34.
HUANG Z, JU L H, FENG W B. Experimental study on transverse sediment transport of artificial beach profile caused by waves [J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 28-34.
- [3] 谭忠华, 刘海成, 陈汉宝, 等. 人工沙滩在堤后次生波作用下的稳定性试验[J]. 水运工程, 2019(1): 35-41.
TAN Z H, LIU H C, CHEN H B, et al. Stability experiment under secondary wave over breakwater of artificial beach[J]. Port & waterway engineering, 2019(1): 35-41.
- [4] 孙连成. 天津港东疆港区人工沙滩冲淤稳定性试验研究[J]. 水运工程, 2009(2): 7-12.
SUN L C. Experimental study on scouring and silting stability of the man-made beach in Dongjiang Harbor Area of Tianjin Port [J]. Port & waterway engineering, 2009(2): 7-12.
- [5] 黄世昌, 姚文伟, 刘旭, 等. 淤泥质海床相邻的岬湾沙滩剖面特征研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(4): 1-9.
HUANG S C, YAO W W, LIU X, et al. Profile characteristics of the beaches adjacent to muddy seabed in the headland bays [J]. Coastal engineering, 2016, 35(4): 1-9.
- [6] 解鸣晓, 杨华, 李孟国, 等. 港口岸线环境补偿人工沙滩工程理论与实践[J]. 水运工程, 2018(4): 26-32.
XIE M X, YANG H, LI M G, et al. Theory and application of environmental compensation artificial beach constructed at coastal harbor shoreline [J]. Port & waterway engineering, 2018(4): 26-32.
- [7] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港海域水文泥沙运动特征[J]. 世界科技研究与发展, 2009, 31(4): 703-707.
FAN E M, CHEN S L, ZHANG G A. The hydrological and sediment characteristics in Lianyungang coastal waters [J]. World Sci-Tech R & D, 2009, 31(4): 703-707.
- [8] 彭俊, 陈沈良. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境分析[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(4): 445-454.
PENG J, CHEN S L. Analysis on sedimentary characteristics and environments in nearshore of Lianyungang [J]. Advances in marine science, 2010, 28(4): 445-454.
- [9] 赵洪波, 王广聚. 连云港海域波浪场数学模型研究[J]. 水道港口, 2007, 28(5): 322-324.
ZHAO H B, WANG G J. Mathematical modeling of wave field in coastal seas near Lianyungang Port [J]. Journal of waterway and harbor, 2007, 28(5): 322-324.
- [10] 张存勇, 冯秀丽. 连云港近岸海域沉积物粒度空间分布特征及其分析[J]. 海洋学报, 2009, 31(4): 120-127.
ZHANG C Y, FENG X L. The spatial distribution and analysis about the grain-size of sediments in the Lianyungang nearshore sea area [J]. Acta oceanologica sinica, 2009, 31(4): 120-127.
- [11] 段以隽. 海州湾沙滩修复整治效果研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
DUAN Y J. Study on the effect of beach restoration and regulation in Haizhou Bay [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [12] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向[J]. 海洋学报, 1980, 2(1): 79-96.
WANG B C, YU Z Y, LIU C Z, et al. The change of coasts and beaches and the movement of longshore sediments of Haizhou bay [J]. Acta oceanologica sinica, 1980, 2(1): 79-96.
- [13] 徐军. 连云港西大堤工程建设影响作用评价[J]. 海洋通报, 2005, 24(5): 67-73.
XU J. The impact assessment of the west breakwater project in Lian-Yun-Gang, Jiangsu Province, China [J]. Marine science bulletin, 2005, 24(5): 67-73.

(下转第 113 页)