

江苏淤泥质潮滩及近岸沙洲的稳定性判别

陈君 赵磊 卫晓庆

(河海大学港口海岸与近海工程学院 江苏 南京 210098)

摘要:从沿海水沙动力环境、岸滩演变特征、沿海经济发展等具体情况出发,利用现场水文测验、多年地形图、遥感资料、数值模拟等技术方法,确定江苏沿海潮滩与主要近岸沙洲的冲淤过程、发育规律,判别控制岸滩与沙洲冲淤调整的主要因素及其影响程度,并进行岸滩与沙洲的稳定性判别。

关键词:淤泥质潮滩;近岸沙洲;动力地貌

中图分类号:TV148

文献标识码:A

文章编号:1003-9511(2012)03-0015-05

淤泥质潮滩是指分布在海岸带潮间带由粘性细颗粒泥沙组成的滩地^[1]。近岸潮流沙洲是发育在陆架浅海海底的一种线性地貌,由一系列平行于潮流方向的沙体及其间的沟槽组成^[2]。淤泥质潮滩及近岸沙洲环境特殊、资源丰富、类型多样,对海岸带的自然环境和社会经济发展影响深刻,如通过潮汐水道向潮滩输水输沙可促使岸滩及沙洲淤涨,提供更多土地资源,潮滩与沙洲间以及各沙洲之间较深的潮汐通道可作为潜在港口资源,潮滩与沙洲具有多种生态环境,极大地丰富生物多样性等。因此,研究淤泥质潮滩与近岸沙洲的地貌特征、水动力特征、发育演变规律等,判别其稳定性,探讨对大型围垦工程的动态响应,对开发利用沿海潮滩与近岸沙洲、修建海岸防护工程等具有十分重要的意义。

1 国内外研究现状

1.1 近岸潮流沙洲的形成与发育研究

近岸潮流沙洲,即 Tidal current ridges^[3]、Linear sandbanks^[4]、Sand ridges^[5],是发育在陆架浅海海底的一种线性地貌,由一系列平行于潮流方向的沙体及其间的沟槽组成^[6]。它是迄今为止所发现的规模最大的底形^[7],广泛存在于潮流强大(一般为 0.5 ~ 2.5 cm/s)并有充足泥沙供应的区域^[8],通常成群出现^[3]。一般认为沙洲的延伸方向与最大潮流方向平行^[3],但是,近期研究发现大多数沙洲(除了岬角附近沙洲)的长轴与最大潮流方向之间有一个夹角,一

般为 7° ~ 15°,极值范围 0° ~ 20°或更大,在北半球呈逆时针方向排列,在南半球呈顺时针方向排列^[9]。

根据预测模型、现场观测及理论基础研究,目前已提出了多个关于沙洲形成和保持机制理论^[10-20]。

a. 潮流在沟槽中的运动形式。潮流在沟槽中以双向螺旋流的形式前进,即在同一槽道中有两股并行的螺旋流。如果择其一股分解开来,在主流向前运动的同时在横向上还迭加了一种环状封闭的副流-纵轴横向环流,这种纵轴横向环流是潮流脊发育成长的直接动力。在这种机制的作用下,能将泥沙从沟槽输送到沙洲顶部,最终导致沙洲系统的维持和增长^[10]。同时,沙洲的横向迁移是由于在沙洲两侧存在的涨、落潮流所导致的沙搬运率不等造成的^[12]。由于沙洲两侧输沙的不平衡造成沙洲脊线弯曲,由直线形逐渐变为“S”形。沙洲也就伴随着涨、落潮潮汐通道的分歧而生,这样一个较大的沙洲就被潮流通道分为 2 个平行的小沙洲。沙洲沿岸迁移并逐渐增加,形成了沙洲群,可由河口或近岸向海延伸直至陆架边缘,美国东南沿海切萨皮克湾的“之”字形沙洲即是由此机理产生^[21]。

b. 与海平面上升相关。通过对许多沙洲的野外观测发现,沙洲的形成是由于在冰后期高海面时期海岸线向陆前进所造成的^[14, 22],且提出了一个与海平面上升相关的大尺度底形演变的地层学模型^[14]。这些低且宽阔的沙体是海侵过程中形成的,高海面时期沙体在沿岸流汇聚的地方加积并与海岸

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAB03B01),国家自然科学基金资助项目(40806018, 41006001)

作者简介:陈君(1974—),女(满族),辽宁丹东人,副教授,博士,从事海岸动力地貌研究。

连为一体,成为海岸线后退的标志。可见近岸沙洲是为响应海平面上升而产生的,一旦断绝了近岸泥沙供应,此沙洲就会与区域性的潮流相互作用,底形便逐渐达到一个平衡状态,泥沙在此脊槽系统中不停地搬运。

c. Huthnance^[18-19]认为强潮流(平均约为1 m/s)和初始的不平坦底床是形成和维持沙洲的主要原因,沙洲的成长是由于接受或适应了最大潮流的方向及其带来的泥沙流,导致沙洲的成长及其主轴特定的布局 and 方向,最终形成了沙洲的平衡地貌形态,在波浪作用下顶部被削平,在不对称潮流作用下形成的不对称横剖面。相对而言,其他动力(如次生流、内潮、瞬时流等)作用下沉积物搬运的延迟作用、底床粗糙率的空间变化等都是不重要的。但是,在某种环境下,这些因素也可能促进沙洲的发育。

1.2 近岸潮流沙洲的稳定性分析

近岸沙洲在空间上的分布往往具有重现性,可形成一系列的沙脊。根据沉积动力学研究结果,这种周期性的分布与潮流流场特征(如潮流长短轴之比、主流流速、主流不稳定性等)和海底沉积物平面分布的非均匀性有关^[18-19, 23-25]。此类型状态的存在说明沙洲处于活动与演变的状态,沙洲是一种准周期性的底形,演变时间尺度从几十年到几个世纪不等^[26]。

早期的研究认为沙洲的形成、发育和迁移是对水动力条件的响应,如Stride^[7]指出,悬移质的最大搬运值与潮汐椭圆中的潮流最大值之间存在滞后现象,从而导致沉积物的搬运倾向于潮流的主轴方向。如果这个主轴方向与沙洲的主轴相平行,当涨、落潮流不对称时,就会发生沉积物向沙洲的净搬运。然而,这一理论却并不完全适用,因为野外观测表明即使一段时期内悬移质的搬运占优势,但是一旦发生风暴潮,只会发生侵蚀而并非堆积。

近年来大量研究表明,在水、沙相互作用体系中,沙的响应所起的作用具有更重要意义。这一思想最早的提出者是Huthnance^[4],野外观测发现沙洲通常与潮流主轴以一定角度相交,他应用水力学方法证明了流经沙洲的潮流会产生一个围绕沙洲的逆时针余流(北半球),沙洲通常与潮流主轴产生30°~60°的夹角。Huthnance^[18]建立了分析沙洲稳定性的地貌动力学模型,并指出当等深线与潮流主轴相交28°时出现最大的扰动流速。Boczar-Karakiewicz^[27]根据重力波建立了分析沙洲成因机制的模型,Carbajal等^[28]对此模型和有关文献^[18-19]作了联合分析,结果表明随沙洲规模随潮流与沙脊间夹角呈指数递减关系,且当水深固定时沙洲规模与潮流流速呈线性

关系。

中国陆架海域宽浅,潮流作用强盛,海底松散沉积物丰富,具备发育潮流沉积和地貌的有利条件。因此,发育了丰富的潮流沉积和地貌。关于陆架潮流沉积的大规模研究是始于20世纪80年代,刘振夏等^[29-32]对潮流沙脊的成因机制、发育条件、地貌特征进行了研究,将我国陆架划分为5个现代潮流沉积体系,每个体系由2~4个潮流侵蚀和沉积地貌单元组成,并对渤海东部潮流动力、地貌和沉积进行了多学科的综合研究。张忍顺等^[33]对江苏岸外的辐射状沙脊群的成因、演变过程、沉积物输送等进行了研究。Li^[24]探讨了长江口外总面积约5万km²左右的大规模潮流沉积体系。高抒等^[25]分析了北部湾南部海域砂质海底的稳定性,探讨了沉积物搬运率的平面分布,海底微地貌形态的迁移速率和海床高程变化。目前,我国对于陆架潮流的研究由于受到各方面条件的限制,对于离岸较远的沙洲研究深度和广度仍然不够,而对于靠近岸滩的或已出露的沙洲的研究则相对较多(如江苏岸外辐射沙洲、长江口沙岛及水下三角洲等)。

1.3 淤泥质潮滩稳定性分析

国内外关于淤泥质潮滩演化规律的研究主要集中在2个方面:一是潮沟系统的稳定性研究。弯曲的潮汐水道是潮滩上重要的地貌组合部分,其侧向摆动频繁,迁移速度较快,有的滩面在5~6年内就会被潮沟扫荡一次,大部分潮滩沉积物均可能在短时间内不同程度地被潮汐水道所改造,因此,其发育和演化可为指示整个潮滩的发育演化提供重要依据,目前主要是通过沉积类型或沉积序列研究、以及航片或卫片进行分析来获取它的动态变化信息。二是潮滩与沙洲的水沙输移特性研究。如对沙洲及潮滩的水动力研究指出,在整个潮汐循环中存在明显的流速突变现象,以及涨、落潮流的不对称模式;再如组成潮滩的沉积物通常来自于相邻的陆域或海域,当悬移质沉积并成为永久沉积物之前,它参与了复杂的沉积与侵蚀的循环模式,每年净输入的大量沉积物便在较长的潮汐循环中被不断地交换。因此,在潮汐作用地区,研究潮滩的水动力及悬沙搬运特征是很重要的,有助于理解和评估淤泥和黏土的细颗粒沉积物的输送路径及岸滩发育。但是上述研究存在一定程度欠缺:一是大多数研究集中于潮汐水道的口门附近的沉积物输送收支和流体动力学、或盐沼岸滩附近、或大型潮汐通道内部,而对于处于大面积沙洲内部的沉积动力特征研究不多。二是对淤泥质海岸上潮沟系统的动力过程有一定程度的了

解,但对沙洲潮沟系统的沉积物搬运过程,尤其是潮沟沉积物净搬运、潮沟与滩面物质交换、潮沟在海岸演化中的意义等仍缺乏了解,且现阶段数学模型过于简化。究其原因在于,沙洲及潮滩环境既受到非单向恒定的潮流、波浪等物理力的作用,又受复杂的沉积物特征(物质组成及粒度分布范围)、生物地球化学因素及大量存在的非线性过程的影响,野外现场观测的难度非常大,数据积累程度较低。

中国淤泥质潮滩约占大陆总海岸线的 1/4,主要分布在长江、黄河、珠江、辽河等河口三角洲及其两侧的海岸平原以及浙江、福建、广东、广西沿海的港湾内,其沉积的研究始于 20 世纪 60 年代,当时主要是由于港口建设的需要。自 20 世纪 80 年代初,为了开发利用海涂资源,淤泥质潮滩调查研究受到十分重视。我国陆架宽阔,沉积模式较为复杂,在过去的几十年里,海岸地貌学家、地质学家、沉积学家以及海岸工程学家对中国淤泥质潮滩地貌、沉积进行了大量研究,初步建立我国淤泥质潮滩沉积研究理论系统^[1,34]。

2 研究目标

江苏沿海滩涂面积广阔,江苏省沿海三市(连云港市、盐城市、南通市)均拥有丰富的滩涂资源,而且辐射沙脊群周围还分布有大规模的滩涂。根据“江苏近海海洋综合调查与评价专项”(简称江苏“908”专项)的调查,全省沿海滩涂总面积 5 001.67 km²,约占全国滩涂总面积的 1/4。潮上带滩涂面积为 307.47 km²,潮间带滩涂面积 4 694.2 km²,其中辐射沙脊群区域理论最低潮面以上面积 2 017.52 km²。

江苏沿海潮滩及近岸沙洲动态变化频繁。沿海潮滩及近岸沙洲发育的泥沙主要来源于古黄河与古长江的泥沙供应,近年来长江入海泥沙逐年减少,2007 年仅为 1.38 亿 t 且主要向东南运移,仅汛期有 10% 的水量及泥沙从长江口向东北济洲岛方向运转,对江苏沿海影响较小;废黄河水下三角洲及辐射沙洲仍然是沿海地区的主要泥沙来源,使江苏沿海成为一个准封闭的泥沙系统,外来泥沙源较少。根据江苏“908”专项测量资料可知,江苏沿海就潮上带及潮间带而言,侵蚀岸段由于海岸防护工程的建设,海岸侵蚀得到了控制,转而表现为不同程度的“假淤积”现象,但是未来随着冲刷逐渐向剖面上部扩展,最后会过渡到全剖面侵蚀,淤积岸段则依旧以一定的速率保持向海淤长。就潮下带及水下岸坡而言,除四卯西河口-小洋口典型淤长型淤泥质岸段外,江苏沿海大部分水下岸坡均曾经历或正在经历一定程

度侵蚀后退,且作用范围逐渐扩大。

根据《江苏沿海地区发展规划》可知,近期(2020 年前)在盐城射阳河口至南通东灶港之间的大丰、东台、如东海岸和港外的辐射沙洲等地进行围垦形成 18 万 hm² 左右的垦区,远期(2050 年前)在东沙、条子泥、腰沙等浅滩沙洲进行围垦形成 46.7 万 hm² 土地后备资源。为实现这一目标,相关规划已将江苏沿海滩涂的起围高程由传统的平均高潮线降低至理论最低潮面以上 2 m,基本上位于海岸盐沼的外缘线(即盐沼-泥坪交接带)。传统的高滩围垦往往在新建海堤外侧至少保留 200 m 宽的互花米草带以保证海岸的持续淤涨趋势,未来的低滩围垦则仅保留少量的海岸盐沼面积或者完全占据草滩带。

可见,对江苏沿海潮滩及近岸沙洲的稳定性进行研究,预测江苏海岸未来演变趋势,可为未来沿海工程建设提供科学依据。因此,本研究拟利用现场水文测验、多年地形图、遥感资料及断面测量资料等,确定江苏沿海潮滩与主要近岸沙洲的冲淤过程与特征,判别控制岸滩与沙洲冲淤调整的主要因素及其影响程度,并提出岸滩与沙洲的稳定性判别指标。

3 研究内容

江苏淤泥质潮滩及近岸沙洲的稳定性判别专题主要涉及 4 个方面的研究内容。

a. 淤泥质潮滩与近岸沙脊群稳定性判别。江苏沿海潮滩按照蚀淤性质不同,可分为四个类型,分别为侵蚀性潮滩、稳定性潮滩和淤涨性潮滩。江苏岸外辐射沙脊群大体上以港为顶点,以黄沙洋为主轴,自岸至海呈展开的褶扇状向海辐射,由 8 条沙脊和分隔沙脊的潮流通道组成。脊槽相间分布,水深多介于 0~25 m,个别深槽最深处可达 38 m,响应于动力环境的改变,脊槽冲淤频繁。根据不同的海岸类型,结合历史地形资料、海洋动力环境资料等,针对不同的海岸类型,进行海岸稳定性分区,明确不同岸段潮滩(沙洲)的冲淤特性与冲淤趋势。

b. 岸滩潮沟系统与近岸潮汐水道动态变化规律。岸滩潮沟系统与近岸潮汐水道是导致潮滩冲淤调整的最主要因素之一,对于滩面宽阔的潮滩而言,通常发育树枝状潮沟系统,呈现周期性摆动现象;对于滩面狭窄的潮滩而言,通常潮沟短小,新生消亡频繁,滩面被切割得比较破碎;对于近岸沙洲而言,则通常发育与岸平行的顺岸潮汐水道,并与相邻潮滩的潮沟系统动态响应。因此,揭示不同规模潮沟系统的消长规律及动态变化趋势,是研究潮滩稳定性的关键因素。

c. 淤泥质潮滩与近岸沙脊群动力地貌响应规律。江苏沿海主要受东海前进潮波系统与南黄海西部旋转潮波系统控制,区域水动力条件复杂、水下地形多变的特点。沿海特殊的淤泥质潮滩和辐射状沙脊群地貌特征是在独特的水沙动力作用下形成的,研究响应于不同的动力环境,沿岸潮滩及沙脊群所形成的各种地貌组合,探讨动力地貌响应规律是十分重要的。

d. 沿海滩涂匡围潜力预测。江苏沿海匡围历史悠久,1951—2007年沿海地区累计匡围滩涂203个垦区,匡围滩涂总面积26.87万 hm^2 (其中包括大丰境内的上海海丰垦区1.75万 hm^2)。沿海匡围工程对沿海潮滩及近岸沙洲的稳定性造成了一定程度的影响。因此,迫切需要根据江苏沿海水沙动力环境、岸滩演变特征、沿海经济发展等具体情况,明确沿海潮滩匡围潜力,促进沿海滩涂资源持续利用。

4 研究方法与技术路线

以海岸动力学、泥沙运动力学、动力地貌学、沉积学以及现代信息学作为理论基础,利用现场地形测量、现场水文调查、实验室基础实验、遥感解译、数值模拟技术等多种手段作为技术支撑,以现场调查资料以及江苏“908”专项的调查研究为基础,结合近30年的多幅遥感卫片以及该海域地形测量、水文观测等项目资料,利用现场水文测验、多年地形图、遥感资料等技术方法,确定江苏沿海潮滩与主要近岸沙洲的冲淤过程与特征,判别控制岸滩与沙洲冲淤调整的主要因素及其影响程度,并提出岸滩与沙洲的稳定性判别指标。

a. 典型区域水文现场观测和水沙特性分析。选择侵蚀性海岸、淤涨性海岸、稳定性海岸的典型盐沼区域,开展现场水文观测;收集沉积、地貌和水沙资料,作为沉积特征和地貌分析、数值模拟和遥感反演的基础数据。

b. 长时间序列地形测量和沉积特征分析。江苏“908”专项在江苏沿海地区共布设了约70条的地形调查断面和沉积物调查断面(基本全部覆盖研究区)本项目可在该70条测量断面中选择研究所需的继续进行测量,能够保证资料的延续性。同时,根据研究需要,在选定的典型区域进行加密测量,开展地形断面测量、滩面表层沉积物采样、现场地貌观测、盐沼植被调查等现场测量工作。

c. 人类活动下海岸盐沼演变趋势预测。综合泥沙沉积特征、地貌特征和水沙输移规律,分析粉砂淤泥质海岸在自然状态下和人类活动影响下的演

变规律,预测人类活动下海岸发育的影响。

技术路线见图1。①选择代表性站位,进行现场水文定点或断面观测,分析江苏近岸潮滩及沙洲的水动力特征、泥沙输移规律,并为数值模拟提供基础验证资料;②在研究区选择典型地形布设测量断面,每季度进行地形测量,掌握断面地形的季度变化及年季冲淤变化速度及淤蚀量;③与地形测量同步进行潮滩沉积物采样,分析潮滩沉积特征与沉积速率;④对长时间序列遥感卫片进行信息提供与解译,分析研究区较长时间尺度的时空变化规律;⑤在上述研究基础上,以“动力-泥沙-地貌”为核心,进行潮滩及近岸沙洲的动力-地貌响应性研究,构建潮滩及近岸沙洲稳定性判别体系。

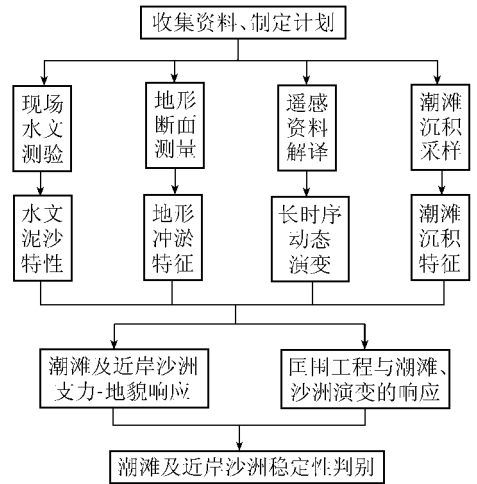


图1 技术路线

5 预期成果

预期成果主要包括:研究潮滩潮沟系统与近岸潮汐水道的发育特征,揭示潮滩、近岸沙脊群的动力地貌响应规律,对江苏海岸发育进行稳定性分区,预测辐射沙脊群主要沙洲的演变趋势,阐明潮滩及近岸沙洲发育对围垦工程响应对策。

根据国务院批准的《江苏沿海地区发展规划》,江苏沿海地区发展战略定位是:立足沿海,依托长三角,服务中西部,面向东北亚,努力把江苏沿海地区建设成为我国东部地区重要的经济增长极和辐射带动能力强的新亚欧大陆桥东方桥头堡。江苏省政府将围绕这个目标,建设大港口、培育大产业、服务大腹地、实现大发展,加快推进沿海地区开发开放。其中,具体举措之一就是科学开发利用沿海滩涂资源,建设重要的土地后备资源开发区。丰富的滩涂资源为产业发展、现代农业和生态建设提供了广阔的空间,按照“科学规划,集约利用,开放合作,园区模式,综合开发”的原则,积极探索新的开发模式,创新开

发机制,努力把丰富的滩涂资源转化为现实的发展优势。本研究可为江苏沿海地区未来工程建设和项目开发提供基础科学依据。

参考文献:

- [1] 钟时 陈吉余 虞志英. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6) 555-562.
- [2] 王颖 朱大奎. 海岸地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [3] OFF T. Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents [J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(2) 324-341.
- [4] HUTHNANCE J M. Tidal current asymmetries over the Norfolk Sandbanks[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1973, 1: 89-99.
- [5] PATTIARATCHI C, COLLINS M. Mechanisms for linear sandbank formation and maintenance in relation to dynamical oceanographic observation[J]. Progress In Oceanography, 1987, 19: 117-176.
- [6] 夏东兴 刘振夏. 潮流脊的形成机制和发育条件[J]. 海洋学报, 1984, 6(3) 361-367.
- [7] STRIDE A H. Offshore tidal sands[M]. New York: Chapman and Hall, 1982.
- [8] ALLEN J R L. Current ripples: their relation to patterns of water and sediment motion[M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1968.
- [9] KENYON N H, BELDERSON R H, STIDE A H. Offshore tidal sand banks as indicators of net sand transport and as potential deposit[J]. Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin, 1981, 4: 257-268.
- [10] HOUBOLT J H C. Recent sediments in the southern bight of the North Sea[J]. Geology Mijnbouw, 1968, 47(4) 245-273.
- [11] SMITH J D. Geomorphology of a sand ridge[J]. Journal Geology, 1969, 77: 39-55.
- [12] CASTON V N D. Linear sand banks in the southern North Sea [J]. Sedimentology, 1972, 18: 63-78.
- [13] CHRISTOPHER R M, ANTONIO B R, BRENT A M, et al. Impact of land-use change and hard structures on the evolution of fringing marsh shorelines[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 88: 365-376.
- [14] SWIFT D J P. Tidal sand ridges and shoal retreat masses[J]. Marine Geology, 1975, 18: 105-134.
- [15] PINGREE R D. The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the sea[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1978, 58: 211-226.
- [16] PINGREE R D, MADDOCK L. The tidal physics of headland flows and offshore tidal bank formation[J]. Marine Geology, 1979, 32: 269-289.
- [17] DOLAN R, HAYDEN B, FELDER W. Shoreline periodicities and linear offshore shoals[J]. Journal Geology, 1979, 87: 393-402.
- [18] HUTHNANCE J M. On one mechanism forming linear sand bank[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982, 14: 79-99.
- [19] HUTHNANCE J M. On one formation of sand banks of finite extent[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982, 15: 277-299.
- [20] HARRIS P T, PATTIARATCHI C B, COLE A R, et al. Evolution of subtidal sandbanks in Moreton Bay[J]. Marine Geology, 1992, 103: 225-247.
- [21] COLEMAN S N, BERQUIST JR C R, HOBBS III C H. Structure age and origin of the bay-mouth shoal deposits[J]. Marine Geology, 1988, 83: 95-113.
- [22] D'OLIER B. Sedimentary events during the Flandrian sea-level rise in the southwest corner of the North Sea[J]. Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin, 1981, 5: 221-227.
- [23] HULSCHER S J H E, DE SWART, H J DE VRIEND. The generation of offshore tidal sand banks and sand waves[J]. Continental Shelf Research, 1993, 13: 1183-1204.
- [24] LIU Z X. Yangtze Shoal: a modern tidal sand sheet in the northwestern part of the East China Sea[J]. Marine Geology, 1997, 137: 321-330.
- [25] 高抒 方国洪 于克俊 等. 沉积物输运对砂质海底稳定性影响的评估方法及应用实例[J]. 海洋科学集刊, 2001(43) 25-37.
- [26] DEVRIEND H J. Morphological processes in shallow tidal seas in residual currents and long-term transport[J]. Springer-Verlag Berlin, 1990, 2: 276-301.
- [27] BOZAR-KARAKIEWICZ B B. Wave dominated shelves: a model of sand ridges formation by progressive infra-gravity waves[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 52(4): 163-179.
- [28] CARBAJAL N, MONTANO Y. Comparison between predicted and observation physical features of sandbanks[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 52(4): 435-443.
- [29] 刘振夏 夏东兴. 潮流脊的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(3) 286-296.
- [30] 刘振夏. 渤海东部全新世潮流沉积体系[J]. 中国科学, 1994, 24(12): 1331-1338.
- [31] 刘振夏 夏东兴 王揆洋. 中国陆架潮流沉积体系和模式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 141-147.
- [32] 夏东兴. 渤海东部更新世以来的沉积环境[J]. 海洋学报, 1995, 17(2): 86-92.
- [33] 张忍顺 陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 37-40.
- [34] SHI Z, CHEN J Y. Morphodynamics and sediment dynamics on intertidal mudflats in China (1961 - 1994) [J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(15): 4909-4926.

(收稿日期 2012-03-20 编辑 张志琴)