

· 综 合 ·



## 潮动力影响下辐射沙脊群的研究进展\*

陈 橙, 王义刚, 黄惠明, 袁春光

(河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 从形态、形成时间、生成机制、粒径分布和物质来源、沙洲演变和水道稳定性等方面简述潮动力影响下辐射沙脊群的研究进展。上千年前因泥沙进入辐射状潮流场而形成了体积庞大、呈辐射状分布的沙脊群。在复杂的潮动力作用下, 辐射沙脊群呈现外部冲刷、中心淤积, 各潮汐汊道趋于稳定的演化特点。提出今后可以将地质研究和水动力研究相结合, 在潮流场模拟中加入泥沙模块, 运用长周期数值模拟技术重现辐射沙脊群形成和演变的全过程, 以弥补现有研究的诸多不足。

**关键词:** 辐射沙脊群; 潮动力; 形成; 演变; 研究进展

中图分类号: TV 143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0017-08

### Advancement in impacts of tidal dynamics on radial sand ridges

CHEN Cheng, WANG Yi-gang, HUANG Hui-ming, YUAN Chun-guang

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper reviews the advancement in impacts of tidal dynamics on radial sand ridges (RSR), including its morphology, development time, formation mechanism, particle size distribution, material sources, sandbank evolution and stability of tidal inlet. Thousands of years ago, huge and radialized RSR was formed because sediment entered the radial tidal current field. Under the effect of tidal dynamics, fringe of RSR was eroded, center of RSR was deposited, and the tidal inlet tends to be stable. This paper proposes that the sediment module can be added in the tidal flow simulation, and long-term model can be applied to reproduce the whole process of formation and evolution of the RSR in order to compensate for many inadequacies of existing research.

**Key words:** radial sand ridges; tidal dynamics; formation; evolution; research advancement

辐射沙脊群位于江苏海岸以东, 具有丰富的滩涂资源, 存储了海岸环境演变的丰富信息<sup>[1]</sup>。沙脊群呈辐射状分布, 地形复杂, 形态特殊<sup>[2]</sup>, 1958年江苏省水利厅第一次绘出了辐射沙脊群基本轮廓, 1979年海军航保部绘制出了辐射沙脊群的分布图, 20世纪80年代以来采取了一系列调查研究, 为学者们认识辐射沙脊群提供了详实的基础资料, 现已成为地质演变和水动力研究的热点<sup>[3]</sup>。本文旨在总结现有研究成果, 分析存在问题, 进一步提出研究和解决问题的方法。

### 1 辐射沙脊群形态

辐射沙脊群又称辐射沙洲<sup>[2]</sup>、潮成沙体<sup>[4]</sup>等, 长约200 km、宽约90 km, 由70多个沙脊组成, 沙脊之间被深槽所间隔, 深槽水深达25m<sup>[5]</sup>。整个沙脊群大致以弶港为顶点, 呈160°向北、东北、东、东南方向辐射状分布, 其规模巨大, 形态特殊, 且具有北大南小的不对称格架。主要的大型沙洲有十多条(条子泥、东沙、亮月沙、太平沙、毛竹沙、外毛竹沙、蒋家沙、牛角沙、河豚沙、大洋沙、火星沙、冷家沙及腰沙等), 并有

收稿日期: 2012-12-14

\*基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAB03B01); 江苏省自然科学基金青年基金(BK2012411)

作者简介: 陈橙(1988—), 男, 博士, 主要从事海岸、河口动力环境及模拟研究。

4条靠岸的深水潮汐通道（西洋、黄沙洋、烂沙洋和小庙洪），具体位置如图1所示。

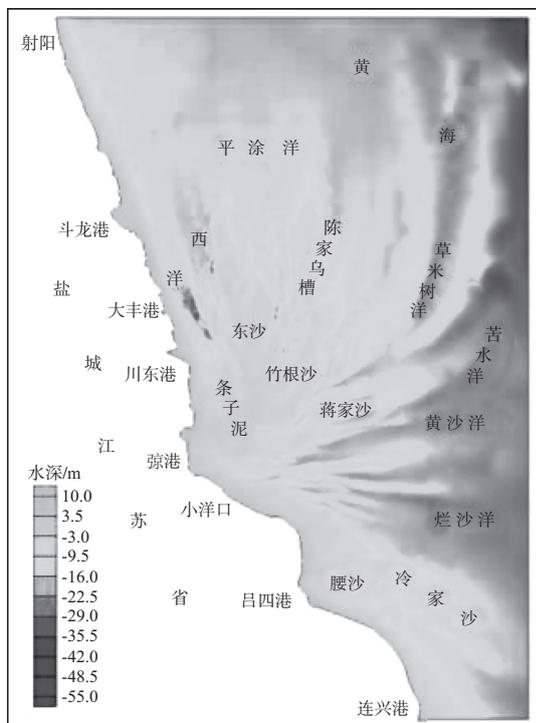


图1 辐射沙脊群示意图

## 2 辐射沙脊群形成时间

辐射沙脊群规模庞大，形成与发展需要漫长的时间。学者们通过各种方法（如潮波系统、海侵海退过程、地层层序、矿质成分、泥沙来源等）研究了辐射沙脊群的形成时间，得出了不同的结论。研究成果见表1。

由表1可见，辐射沙脊群形成时间尚未确定。目前为止，以海侵海退过程为依据的观点只是一种推测，难以重现；而以地层层序、矿质成分为依据的观点，因钻孔采样成本高昂，无法在庞大的辐射沙脊群普遍进行。以泥沙来源为依据的观点，认为巨大的辐射沙脊群仅由黄河几百年的泥沙提供而形成，这个观点还有待于进一步研究。以潮波系统为依据的观点虽具有一定的合理性，但未能阐述辐射沙脊群在庞大而复杂的潮波系统中具体形成的过程，因此不够完善。若能重现辐射沙脊群在潮波系统中形成的过程，那么对于其形成时间的问题的认识也就能向前迈进一大步了。

表1 关于辐射沙脊群的形成时间的研究成果

形成时间	研究者	依据 / 观点
10 000~8 500 aBP	王建等 <sup>[6]</sup>	对15 000 aBP以来30个典型时期的海岸线情况下的东中国海潮波系统进行了数值模拟，认为大约10 000~8 500 aBP之间已经具备发育的动力条件。
约8 000 aBP	陈报章等 <sup>[7]</sup>	8 000 aBP前后的冰后期海面上升，形成了河口湾形状，M2系统潮波由旋转流变为往复流，长江携带的泥沙发育成潮成沙堤。
6 000~5 000 aBP	Li等 <sup>[8]</sup>	6 000~5 000 aBP古长江河口坝形成，长江三角洲向海延伸，并且辐射状潮流场移至辐射沙脊区。
5 000 aBP	张家强等 <sup>[4]</sup>	分析了苏北亚近代潮成沙体分布区的地层层序，认为苏北亚近代潮成沙体的沉积时间应在冰后期海退阶段，开始发育的时间大约在5 000 aBP。
4 000 aBP	张光威等 <sup>[9]</sup>	通过对最接近潮流沙脊的QC2钻孔各项指标的分析 and 比较，据其层位和沉积相序组合判定，南黄海陆架沙脊最早形成年代为距今4 000 a。
2 000 aBP	杨子庚等 <sup>[10]</sup>	在全新世海相层潮流砂脊的南部向南约100 km水深31.7 m处的海底发现贝壳砂层，14 C年代2135±220 a。
最近100多年	万延森 <sup>[11]</sup>	在1182—1855年的727 a间，黄河大量泥沙入海，使岸线向海推进约90 km，并堆积了大面积的水下三角洲，促使沙脊的发展。

## 3 水动力特性与形成机理

沙脊群是由于潮流和可移动的外来沙源共同作用形成的<sup>[12]</sup>，并受到潮流和波浪的改造<sup>[13]</sup>。举世罕见的辐射状沙脊群的形成与复杂的水动力特性密切相关，因此水动力特性与形成机理成为了研究热点之一。

### 3.1 波浪和潮流特性

该区域有着复杂的波浪和潮流特性。Feng等<sup>[14]</sup>和Yang等<sup>[15]</sup>对该区域的波浪特性进行了研究，认为波浪在向岸传播过程中发生多次破碎，波高等值线在近岸处以琼港为中心呈现弧形分布，不同的地形和不同的入射方向将产生不同的波场，

同时也将形成不同的波能聚集区。然而波浪对沙脊群作用比较有限, 而潮流是沙脊形成的主要动力, 因此学者们更加注重于该区的潮动力研究。东海传入黄海的前进潮波与山东半岛对入射潮波反射而形成的逆时针旋转潮波相交汇, 在南黄海西部产生了大潮差、强潮流的辐射状分布的潮流场。全区受 $M_2$ 潮波控制, 不同时期的岸线变化对潮流场有显著影响, 废黄河三角洲侵蚀后,  $M_2$ 分潮的无潮点逐渐向西南移动<sup>[3]</sup>。目前无潮点在(121.686° E, 34.6° N), 沙脊区北部呈往复流, 南部呈旋转流<sup>[16]</sup>。

### 3.2 形成机理

对于辐射沙脊群的形成机理, 存在两种不同观点。第一种观点认为局部地形决定了辐射状潮流。苏北地区海岸线开阔, 水下岸坡宽浅, 为辐射沙脊群的形成提供了前提<sup>[17]</sup>; 淤港呈喇叭口状, 沙脊群以淤港为顶点呈辐射状分布, 这一特殊地貌形态是导致潮流辐聚辐散的根本原因<sup>[9]</sup>。正是由于特殊的岸线与海底地形控制了潮流场, 使潮流场产生辐聚和辐散, 进而提供了辐射沙脊群形成和发展的必要条件。第二种观点认为辐射状潮流的产生与局部地形无关, 而是由客观存在的辐射状潮流场结合上充足的泥沙供应塑造成辐射沙脊群。许多学者通过证实辐射状潮流场客观存在性、长期稳定性以及潮流塑造泥沙的机制来支持第二种观点。

#### 3.2.1 辐射状潮流场客观存, 不因局部地形产生

夏综万等<sup>[18]</sup>对黄海的 $M_2$ 潮进行数值模拟, 采用差分网格长宽各约20 km (掩盖了海底的沙脊、海沟之类的信息, 只反映出一种渐变的海底地形), 模拟出了辐射潮流分布。朱玉荣等<sup>[19]</sup>用接近计算自然陆架坡度的均匀倾斜海底 (完全消除海底沙洲地形对潮流场的影响), 对南黄海辐射沙脊群区的潮流椭圆和潮流场进行数值模拟, 结果表明辐射状潮流场不依赖于海底地形而存在。Zhang等<sup>[20]</sup>用辐射沙脊群水域潮流场、波浪场和风暴流场的数值模拟结果解释了黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制, 即潮流形成——风暴破坏——潮流恢复。因此, 客观存在的辐射状潮流

是沙脊发育的内因, 两大潮波的辐聚以及辐合带的迁移则是将沙脊群塑造成辐射形态的动力因素。

#### 3.2.2 长期的、较为稳定的辐射状潮流场为沙脊群发育提供保证

既然辐射状潮流场是客观存在的, 那么其长期稳定性也成为研究课题, 即古代是否就已存在辐射状潮流场, 并延续至今? 赵娟等<sup>[21]</sup>认为, 古潮流的研究揭示了潮成砂区内同样存在辐聚辐散的古潮流场, 其顶点位于东台附近。张东生等<sup>[22]</sup>对古海岸情况下的 $M_2$ 潮波传播进行数值试验, 首次给出了7 000 a前的 $M_2$ 潮波分布, 结果表明控制古河口地区以及现代辐射沙脊群地区的是同一个潮波系统, 该系统也提供了特定的动力条件, 从而可以维持现代的黄海海底辐射沙脊群。朱玉荣<sup>[23]</sup>建立了渤海、黄海、东海的二维潮流数学模型, 对7 000 aBP与3 800 aBP的潮汐、潮流进行了数值模拟, 由计算结果推断出从7 000 aBP的末次冰期最大海侵到现在, 长江口、苏北岸外的辐射状潮流场一直存在, 并没有因江苏海岸的变迁而发生根本变化。

#### 3.2.3 局部潮流形态也有利于沙脊的塑造和发育

诸裕良<sup>[24]</sup>和宋志尧<sup>[25]</sup>等又对局部潮流场进行研究, 认为局部的往复流和环流也有利于沙脊的形成。诸裕良等应用二维潮流数学模型对南黄海辐射沙脊群海域潮流运动进行了大、中、小潮长时间序列连续数值模拟, 认为大潮差、辐射状潮流场及一定强度的定向往复流营造了辐射状的沙脊群, 潮流是辐射沙脊群发育的基本动力。宋志尧等首次应用三维潮流数学模型进行潮流脊潮流动力问题的分析和探讨, 结果表明辐射沙脊群各深槽受定向往复潮流作用 (流速普遍在0.5~2.5 m/s), 其底层流速具有旋转流特征, 其横断面在潮流运动中大都会出现次生横向环流或滚流, 其地形坡折处也存在着近0.5 m/s的上升流和下切流, 这些不仅有利于沙脊的塑造, 也极有利于沙脊的发育。

以上研究成果, 都能够证明辐射状潮流场的客观存在性以及长期稳定性。然而, 这些研究还不够完善, 例如在潮流场的模拟过程中并未综

合考虑几千年以来海岸线、海底地形及海平面变化，没有重现潮流场连续的变化过程。同时，在潮流场的模拟中缺少对泥沙的模拟，未能阐述沙脊群与潮流场的相互作用及其演变过程。因此，这些都将成为今后研究工作的方向。

#### 4 粒径分布及物质来源

潮流通过携带不同粒径的泥沙影响辐射沙脊群的粒径分布，而河流又能将陆域的泥沙输送到海中，成为辐射沙脊群物质的来源。泥沙粒径分布是对潮动力的响应<sup>[26]</sup>，而物质来源又是阐述其形成过程的重要途径之一。

##### 4.1 粒径分布

辐射沙脊群的物质主要是质纯均一，分选好的细砂，中值粒径范围2~4 $\phi$ <sup>[27]</sup>。东沙沙脊群的沉积物主要有砂、砂质粉砂和粉砂质砂3种类型<sup>[28]</sup>。条子泥二分水滩脊断面沉积物的中值粒径和平均

粒径均以4~5 $\phi$ 为主<sup>[29]</sup>。苦水洋东侧沙脊钻孔显示主要以粉砂为主，其次为砂，平均值为4.7 $\phi$ <sup>[30]</sup>。西洋潮流通道底质中最主要的是细砂级的沉积物<sup>[31]</sup>。西太阳沙沙脊北缘沉积物主要由极细砂和粉砂质砂组成，均值为3.8 $\phi$ <sup>[32]</sup>。烂沙洋水道主要以粉砂组分为主(>4 $\phi$ )<sup>[33]</sup>。

由此可见，独特的潮动力条件以及复杂的物质来源导致辐射沙脊群具有粒度变化范围广、组成成分复杂等特性，这也说明了通过物质组成来分析辐射沙脊群的形成过程十分困难。不同强度的潮流携带着不同粒径的泥沙，因此通过粒径分布佐证潮流的分布也未尝不可。

##### 4.2 物质来源

古时候中国沿海已有较高的泥沙供应率<sup>[34]</sup>。河流携带泥沙入海，海流搬运泥沙，二者都可能成为辐射沙脊群物质来源的途径。目前，学者们存在着以下5种观点，见表2。

表2 关于辐射沙脊群的物质来源的研究成果

物源	研究者	研究方法	观点
长江、黄河	周长振等 <sup>[35]</sup>	分析砂体沉积物垂直分布特征	沉积物的上部是黄河带来的陆源物质，下部是古长江三角洲的物质，古长江三角洲是沙脊发育的基底。
	李成治等 <sup>[17]</sup>	对比矿物组合资料	
	黄易畅等 <sup>[36]</sup>	对比沙脊沉积物与黄河长江沿岸物质	
	Li等 <sup>[37]</sup>	分析钻孔孔心和地表穿透剖面	
长江	Wang等 <sup>[5]</sup>	分析重矿物和粘土矿物样本	早期来自长江，后期来自黄河，还有海床冲刷物。主体来自长江，北部物质来自黄河补给。
	仲德林等 <sup>[38]</sup>	分析美国地球资源技术卫星多谱段相片	物质基础是古长江水下三角洲。
	傅命佐等 <sup>[39]</sup>	分析沉积物粒度、矿物、孢粉、沉积结构	沉积物主要是古长江入海物质。
黄河、淮河	张光威 <sup>[9]</sup>	对钻孔样品进行测试	物质的来源应为黄河和淮河。
其他地方	杨长恕 <sup>[40]</sup>	分析沿岸流的动力条件、沉积物的粒度特征及砂体规模与分布	本身就是一个独立的巨大的潮成三角洲。
	赵松龄 <sup>[41]</sup>	分析来自苏北平原和长江三角洲地区若干钻孔所含海相地层以及岩心粒度	是独立的“沙漠堆积体”。
	陈报章 <sup>[42]</sup>	对比较沉积学进行研究	是埋藏潮沙体的发展延续。
	尤坤元等 <sup>[43]</sup>	研究区冲出的老壳发现于深槽海底	泥沙来自沙洲底部老沉积侵蚀
	万延森等 <sup>[44]</sup>	对江苏近岸海区进行的悬浮泥沙取样、浅地层探测和水深测量资料进行分析	来源于各新老河流，有古长江、古黄河、古淮河和古长江沉积混合物，还有当地底质。
	王建等 <sup>[6]</sup>	总结前人研究成果并结合钻孔的岩相分析及数值模拟结果。	来源于不同时代不同类型的沉积物与河流、海流、潮流、风暴流及风等动力带入围物质的混合物。

由表2可知，对于辐射沙脊群的物质来源这一问题，研究者主要从形态特征或者沉积物的粒度、矿物组成等进行推测。虽然这些分析具有实际意义和参考价值，但是研究者们各执一词，未有定论。若将不同的物质来源结合特定的辐射状

潮流场，进而将形成的沙脊群形状与如今的辐射沙脊群进行比对，不失为另一种有效的研究途径。

#### 5 潮动力作用下沙脊群演变及潮流通道稳定性

辐射沙脊群处于复杂的潮动力环境中，受到

强潮流的重塑、搬运和堆积<sup>[45]</sup>。潮流的走向和强度直接影响着辐射沙脊群的演变以及潮流通道的稳定性,而沙脊和潮流通道又影响着潮动力条件<sup>[46]</sup>,二者相互依存、相互影响,构成了水沙的动态平衡。因此,研究辐射沙脊群的演变及潮流通道稳定性也有助于研究该海域潮动力条件。

### 5.1 整体演变

在潮动力的影响下,辐射沙脊群整体在短时间内处于动态平衡状态,而在几十年的时间尺度内发生重大演变。Xing等<sup>[16]</sup>从潮动力角度研究,认为泥沙净输移指向沿海潮滩和长江水下三角洲。辐射沙脊群的发育将经历4个阶段:暗沙→明沙→成岛→陆<sup>[47]</sup>。近岸悬沙浓度较高,浅沙脊群中心及陆岸岸滩仍有淤积,但大部分沙洲受侵蚀,故整体上呈现出萎缩和破碎状态<sup>[48]</sup>。沙洲整体向陆迁移的同时,水道及其之间的沙洲还普遍存在逐渐向南偏移的趋势<sup>[2]</sup>。另外,海平面的上升影响着沙脊的沉积模式<sup>[49]</sup>,因此张忍顺等<sup>[50]</sup>还考虑了海平面上升对辐射沙脊群演变的影响,认为江苏海岸是一个沉积物准封闭系统,辐射沙脊群海域整体缺少外来泥沙的供给,在全球性海平面上升的情况下,侵蚀海岸线的长度将增加,辐射沙脊群区域的外围沙洲将因侵蚀而向中心区退缩,辐射沙脊群的总面积势必逐渐缩小,但内部的调节作用可以使一部分沙洲在海面上升过程中得以淤高,并在一定时期内继续存在。

总之,辐射沙脊群在缺少外部泥沙供给的条件下,受到复杂的潮动力作用,整体演变可以概括为:外侧冲刷萎缩,中心淤积并陆。目前,研究者主要通过对卫星图象或地形资料进行观察研究,遥感技术的进步<sup>[51]</sup>为研究者从潮动力的角度分析其演变机制提供了有益的帮助。

### 5.2 局部演变

沙脊群枢纽地区处于不断的生长、扩张过程中,南部区域堆积与侵蚀作用较弱,沿岸潮滩向海淤进,而北部区域变化较强烈,并延续脊槽相间的模式<sup>[52]</sup>。弶港地区海岸将继续淤积增长向海推进,终将成为海岸向海突出段<sup>[53]</sup>。大东沙与西沙趋于连成一体,以弶港为顶点,拼陆的可能性

较大<sup>[54]</sup>。条子泥相对稳定区域主要分布在弶港近岸边滩及二分水滩脊<sup>[55]</sup>,整体上有一定幅度的东移和南移。亮月沙、小阴沙、竹根沙等小型沙洲以向南—南东移动为主<sup>[56]</sup>。东沙近30年来面积有所缩小且有外围向中央收缩的趋势<sup>[57]</sup>,同时还有向东倒退的强烈趋势<sup>[58]</sup>。近年来外毛竹沙已经向北延伸30 km;蒋家沙南部受侵蚀,整体向北偏东延伸11 km;而毛竹沙与太平沙之间的菱形“无名沙”向北延伸约11 km<sup>[59]</sup>。西太阳沙主体位置基本稳定<sup>[60]</sup>。可见,辐射沙脊群的局部演变复杂多样,研究其演变规律将对开发和围垦具有指导意义。

### 5.3 潮流通道稳定性

潮流通道需要潮流维持其稳定性<sup>[61]</sup>,是海洋伸入陆地相当远距离的支汊<sup>[62]</sup>以及岛屿之间的短窄水道<sup>[63]</sup>,可作为港口的深水航道。辐射沙脊群的四大潮流通道的稳定性受到了许多学者的关注。

#### 1) 西洋水道。

学者们根据野外调查资料<sup>[64]</sup>,利用地理信息系统、遥感研究、沉积物粒度、矿物、微体及水文泥沙资料分析<sup>[65]</sup>,认为西洋水道处于不断刷深和展宽的过程,目前基本上处于冲淤动态平衡状态或微冲状态,是一条稳定的潮流通道。

#### 2) 黄沙洋水道。

黄沙洋受浅水区泥沙的影响不显著,具有含沙量不大、水深流急的特点<sup>[66]</sup>。1963—1968年至1979年整体呈现冲淤动态平衡的趋势,净冲淤速率为+0.085/a。1979—2005年潮流通道内段冲刷加深,潮流通道更加成型<sup>[67]</sup>。因此,从长远看,维持深槽稳定是必然趋势。

#### 3) 烂沙洋水道。

对于烂沙洋水道稳定性,何华春等<sup>[68]</sup>在实测资料的基础上结合遥感影像、地理信息系统、沉积物粒度、主元素及水动力条件等多种研究方法进行分析,杨树森等<sup>[69]</sup>通过多年实测地形资料和卫星图像资料的研究,均认为烂沙洋已进入稳定状态。

#### 4) 小庙洪水道。

喻国华等<sup>[70]</sup>运用沉积学、地貌学和海洋动力学方法,对小庙洪水道进行了历史演变、现代

动态及稳定性分析, 提出淹没性潮汐汉道的稳定性。Zheng等<sup>[71]</sup>建立了小庙洪淹没型潮汐汉道的  $P-A$  关系表达式, 认为整个小庙洪水道已稳定。

可见, 各大潮流通道经过长期的演变, 均进入稳定状态。然而, 潮流通道作为水沙相互作用的主要场所, 存在复杂的潮动力以及泥沙运输状态, 其稳定机理及稳定条件的判断还有待于进一步研究。

## 6 结论与展望

对于辐射沙脊群这一特殊地貌的研究一直是水力学及泥沙运动力学研究中的重要课题之一。辐射沙脊群以琼港为顶点呈辐射状分布, 有十多条大型沙洲和四条靠岸深水潮汐通道。上千年前, 东海的前进潮波与山东半岛的反射潮波汇聚成辐射状潮流场, 并一直独立、客观、稳定存在着, 各大河流将泥沙带入辐射状潮流场, 逐步形成庞大的辐射沙脊群。近年来辐射沙脊群已无泥沙供给, 在复杂的潮动力作用下发生外部冲刷萎缩、中心淤积并陆、沙洲局部移动的演变。在辐射状潮流作用下, 各潮汐水道已进入稳定状态。

笔者认为, 对于复杂潮动力条件下辐射沙脊群的研究还存在诸多不足, 今后的研究工作可从以下几个方向开展:

1) 对于辐射沙脊群的形成时间各家说法不一, 以往的研究方法虽取得一定进展却难以得到统一的定论。若能重现辐射沙脊群在潮波系统中形成的过程, 那么对于形成时间问题的认识也就能有较大的进展。

2) 大多数学者已经认可辐射沙脊群是由辐射状潮流场作用下形成的, 但研究方法还有待于完善。若能进一步阐述海岸线变化、地形变化和海平面变化情况下潮流场几千年连续变化的过程, 将更令人信服。此外, 在潮流场的模拟中加入泥沙的模拟, 运用长周期数值模拟技术来描述泥沙与潮流场的相互作用以及长周期演变过程也成为今后重要的研究方向。

3) 对于辐射沙脊群的物质来源这一问题, 研究者大多从沉积物的粒度、矿物组成等角度进行

推测, 大都各执一词, 未有定论。将不同物质来源配对特定的辐射状潮流场, 进而把模拟的沙脊群与当前的辐射状沙脊群进行比对, 不失为另一种可行的方法。

4) 目前对于沙洲的演变主要通过卫星图象或地形资料进行观察研究。今后的研究还可以从潮动力角度入手, 探究水流和泥沙相互作用导致沙脊的演变的机制。

5) 各大潮流通道已经在自然状态下进入稳定状态。然而, 随着围垦活动的进行以及人工建筑物的建设, 势必会对潮流通道产生影响。分析其影响程度, 考虑如何合理开发利用和保护辐射沙脊群这一宝贵的自然资源, 也将成为今后研究工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 陈可锋, 陆培东, 王艳红, 等. 南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 267-273.
- [3] Chen K F, Wang Y H, Lu P D, et al. Effects of coastline changes on tide system of yellow sea off Jiangsu coast, China [J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(4): 741-750.
- [4] 张家强, 李从先, 丛友滋. 苏北南黄海潮成沙体的发育条件及演变过程[J]. 海洋学报: 中文版, 1999, 21(2): 65-74.
- [5] Wang Y, Zhang Y Z, Zou X Q, et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea: Origin by river, sea interaction [J]. Marine Geology, 2012, 291-294(1): 132-146.
- [6] 王建, 闫国年, 林琿, 等. 江苏岸外潮流沙脊群形成的过程与机制[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1998, 21(3): 99-112.
- [7] 陈报章, 李从先, 业治铮. 冰后期长江三角洲北翼沉积及其环境演变[J]. 海洋学报: 中文版, 1995, 17(1): 64-75.
- [8] Li C X, Zhang J Q, Fan D D, et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, east China [J]. Marine Geology, 2001, 173(1-4): 97-120.

- [9] 张光威. 南黄海陆架沙脊的形成与演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 25-35.
- [10] 杨子赓. 南黄海陆架晚更新世以来的沉积及环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 1-19.
- [11] 万延森. 江苏近海辐射状沙脊地貌的发育[J]. 地理研究, 1988, 7(2): 41-49.
- [12] Liu Z X, Berne S, Saito Y, et al. Internal architecture and mobility of tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(13): 1 820-1 834.
- [13] Dyer K R, Huntley D A. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(10): 1 285-1 330.
- [14] Feng W B, Yang Y Z, Yang Y F. Characteristics of the wave field in the radial sand ridge field of South Yellow Sea [C]//Proc of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: International Society of Offshore and Polar Engineers Pres, 2010: 834-839.
- [15] Yang Y Z, Feng W B. Mathematical model of wave transformation over radial sand ridge field on continental shelf of South Yellow Sea [J]. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(1): 36-46.
- [16] Xing F, Wang Y P, Wang H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294(1): 192-210.
- [17] 李成治, 李本川. 苏北沿海暗沙成因的研究[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(4): 321-331.
- [18] 夏综万, 王锺楛. 黄海M<sub>2</sub>分潮的数值模拟[J]. 黄渤海海洋, 1984, 2(1): 1-7.
- [19] 朱玉荣, 常瑞芳. 南黄海辐射沙洲成因的潮流数值模拟解释[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(2): 90-96.
- [20] Zhang C K, Zhang D S, Zhang J L. Tidal current-induced formation—storm-induced change—tidal current-induced recovery—Interpretation of depositional dynamics of formation and evolution of radial sand ridges on the Yellow Sea seafloor [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 42(1): 1-12.
- [21] 赵娟, 范代读, 李从先. 苏北海岸带潮成辐射砂脊群的形成及其古地理意义[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 41-48.
- [22] 张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的M<sub>2</sub>潮波[J]. 河海大学学报, 1996, 22(5): 37-42.
- [23] 朱玉荣. 苏北滨海平原区古潮流场的数值模拟及其验证[J]. 海洋通报, 1998, 17(3): 1-7.
- [24] 诸裕良, 严以新, 薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——I. 潮流运动平面特征[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, 28(5): 403-410.
- [25] 宋志尧, 严以新, 薛鸿超, 等. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——II. 潮流运动立面特征[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, (5): 411-417.
- [26] Zhou J J, Zhang C K, Tao J F. Response relation between sediment particle-size distribution and hydrodynamic characteristics in offshore area of Jiangsu province [C]//Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012: 1 471-1 474.
- [27] 刘振夏. 江苏潮流砂的粒度特征及其沉积环境的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 25-33.
- [28] 陈君, 王义刚, 张忍顺. 江苏岸外东沙沙脊群的沉积特征[J]. 海洋通报, 2006, 25(6): 37-46.
- [29] 陈君, 张忍顺. 江苏岸外条子泥二分水滩脊的沉积特征[J]. 海洋通报, 2003, 22(3): 23-30.
- [30] 刘群. 南黄海辐射沙脊群苦水洋东侧沙脊晚更新世以来沉积环境演化[D]. 南京: 南京大学. 2011.
- [31] 殷勇, 张宁. 南黄海辐射沙脊群西洋潮道晚更新世晚期以来沉积环境[J]. 古地理学报, 2010, 12(5): 618-628.
- [32] 殷勇, 邹欣庆, 朱大奎, 等. 南黄海辐射沙洲西太阳沙海域钻孔沉积环境分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 724-734.
- [33] 侯庆志. 辐射沙洲中南部“水道—沙洲”系统稳定性研究[D]. 南京: 南京师范大学. 2006
- [34] Berbe S, Vagner P, Guichard F, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2002, 188(3-4): 293-315.
- [35] 周长振, 孙家淞. 试论苏北岸外浅滩的成因[J]. 海洋地质研究, 1981, 1(1): 83-91.
- [36] 黄易畅, 王文清. 江苏沿岸辐射状沙脊群的动力机制探讨[J]. 海洋学报: 中文版, 1987, 9(2): 209-215.
- [37] Li C X, Zhang J Q, Yang S Y, et al. Characteristic and paleoenvironmental evolution of subaerial tidal sand body in Subei coastal plain [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 42(1): 52-60.
- [38] 仲德林, 申宪忠, 夏东兴, 等. 全新世早期古长江海侵三角洲卫片初步解释[J]. 海洋科学, 1983, (2): 16-17.
- [39] 傅命佐, 朱大奎. 江苏岸外海底沙脊群的物质来源[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1986, 22(3): 536-544.

- [40] 杨长恕. 琼港辐射沙脊成因探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(3): 35-44.
- [41] 赵松龄. 苏北浅滩成因的最新研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(3): 105-112.
- [42] 陈报章. 苏北琼港地区埋藏潮沙体的发现与现代辐射状潮流沙脊群的成因[J]. 海洋通报, 1996, 15(5): 46-52.
- [43] 尤坤元, 王颖, 王雪瑜, 等. 江苏北部岸外辐射沙洲有孔虫分布及其沉积环境分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1998, 34(6): 650-654.
- [44] 万延森, 张耆年. 江苏近海辐射状沙脊群的泥沙运动与来源[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(5): 392-399.
- [45] Yang C S. Active, moribund and buried tidal sand ridges in the East China Sea and the Southern Yellow Sea [J]. Marine Geology, 1989, 88(1-2): 97-116.
- [46] Restrepo J M. Wave-current interactions in shallow waters and shore-connected ridges [J]. Continental Shelf Research, 2001, 21(13-14): 1331-1360.
- [47] 张忍顺, 王艳红, 吴德安, 等. 江苏岸外辐射沙洲区沙岛形成过程的初步研究[J]. 海洋通报, 2003, 22(4): 41-47.
- [48] 宋召军. 南黄海辐射沙洲海区悬沙及沙洲演变的遥感研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2006.
- [49] Chen Z Y, Saito Y, Hory K, et al. Early Holocene mud-ridge formation in the Yangtze offshore, China: a tidal-controlled estuarine pattern and sea-level implications [J]. Marine Geology, 2003, 198(3-4): 245-257.
- [50] 张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 469-478.
- [51] Yu Z F, Chen X L, Tian L, et al. Remote sensing retrieval of turbidity near radial sand ridges area in the south yellow sea using HJ-1A/B CCD imagery [J]. Future Control and Automation, 2012, 172: 121-127.
- [52] 李海宇, 王颖. GIS与遥感支持下的南黄海辐射沙脊群现代演变趋势分析[J]. 海洋科学, 2002, 26(9): 61-65.
- [53] 杨治家, 李本川. 江苏沿海辐射状沙脊群的动态变化[J]. 海洋科学, 1995(4): 63-67.
- [54] 申宪忠, 仲德林, 张凤岐. 利用陆地卫星象片对江苏潮流沙脊群的分析研究[J]. 黄渤海海洋, 1983, 1(1): 74-79.
- [55] 丁贤荣, 康彦彦, 葛小平, 等. 辐射沙脊群条子泥动力地貌演变遥感分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 231-236.
- [56] 吴曙亮, 蔡则健. 江苏省沿海沙洲及潮汐水道演变的遥感分析[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(6): 1-5+1.
- [57] 陈君, 王义刚, 张忍顺, 等. 江苏岸外辐射沙脊群东沙稳定性研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 105-113.
- [58] Chen L F, Zhang Y. Analysis of the evolution on tidal flat and their reasons in Dongsha based on remote sensing [C]// Proc of the 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services. Fuzhou: IEEE Computer Society, 2011: 557-561.
- [59] 吴永森, 李日辉, 吴隆业, 等. 苏北近岸水域“五条沙”侵蚀发育的卫星监测[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 188-194.
- [60] 侯庆志, 徐敏, 陆培东. 辐射沙洲南翼“水道—沙洲”系统与西太阳沙的稳定[J]. 海洋科学, 2006, 30(6): 16-22.
- [61] Tver D F. Ocean and Marine Dictionary [M]. Centreville: Cornell Maritime Press, 1979.
- [62] US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual [M]. 2nd edition. Washington DC: US Government Printing Office, 1975.
- [63] Bates R L, Jackson J .A. Glossary of Geology [M]. 2nd edition. Alexandria: American Geological Institute, 1980.
- [64] 朱大奎, 龚文平. 江苏岸外海底沙脊群西洋水道的稳定性分析[J]. 海洋通报, 1994, 13(5): 36-43.
- [65] 尤坤元, 朱大奎, 王雪瑜, 等. 苏北岸外辐射沙洲王港西洋潮流通道稳定性研究[J]. 地理研究, 1998, 17(1): 11-17.
- [66] 赵洪波, 钱敏. 江苏如东附近海域泥沙运动遥感分析[J]. 水道港口, 2004, 25(1): 34-37.
- [67] 高敏钦. 南黄海辐射沙脊群冲淤变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [68] 何华春, 邹欣庆, 李海宇. 江苏岸外辐射沙脊群烂沙洋潮流通道稳定性研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(1): 12-16.
- [69] 杨树森, 杨镜吾, 曹祖德. 如东海岸的建港优势与深水港建设的可行性[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 357-360.
- [70] 喻国华, 陆培东. 江苏吕四小庙洪淹没性潮汐汉道的稳定性[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 127-134.
- [71] Zheng J H, Zhao Y H, Chen K F, et al. Numerical analysis of current characteristics in submerged tidal inlet off Jiangsu Coasts[C]// Proc of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference. USA, Hawaii: the International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE), 2011: 937-943.