

辐射沙脊群泥沙来源及输运研究综述

王义刚,张薇娜,黄惠明,陈 橙

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**对辐射沙脊群海域形成时间、物质基底以及现代辐射沙脊群物质来源的研究进展进行综述,并结合“十二五”国家科技支撑项目近期关于辐射沙脊群海域泥沙来源以及泥沙输运过程的一些成果,认为现代长江口与江苏沿岸的泥沙交换和北、东、南 3 个方向进出辐射沙脊群区的泥沙量级等问题有待进一步研究确定。

**关键词:**辐射沙脊群;泥沙来源;泥沙输运;泥沙量级;综述

**中图分类号:**TV141      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2015)05-0059-09

**Review of studies on sources and transport of sediment in radial sand ridges//**WANG Yigang, ZHANG Weina, HUANG Huiming, CHEN Cheng( College of Port Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper reviews the formation time, sediment foundation, and sediment sources of radial sand ridges (RSR). Based on some recent outcomes of the sources and transport process of sediment in RSR obtained from the National Science-Technology Support Plan Projects during the Twelve Five-Year Plan period, it is pointed out that research on sediment exchange between the Yangtze Estuary and coastal areas of Jiangsu Province, as well as orders of magnitude of sediment flowing into and out of RSR in the north, east, and south directions, should be carried out.

**Key words:** radial sand ridges; source of sediment; sediment transport; order of magnitude of sediment; review

辐射沙脊群分布于江苏省中南部海岸,位于黄海南陆架海域,长约 200 km、宽约 90 km,由 70 多个沙脊组成,沙脊之间被深槽间隔,深槽水深达 25 m<sup>[1]</sup>。辐射沙脊群的地貌类型世界独特,潮流沙脊与潮汐水道在江苏省海岸中部交互复合,呈辐射状展开,是海岸带最大的海底地貌复合体(图 1)<sup>[2-4]</sup>。

辐射沙脊群地区集中了江苏省大部分海上土地资源,在辐射沙脊群高程较高的中心区的垦区,需四周匡围,具有低潮滩面出露面积大、淤长迅速、高潮四周环水等特点,如条子泥、东沙、高泥、腰沙、冷家沙等沙洲,是当前江苏省沿海大开发规划围垦主要区域<sup>[5-6]</sup>。沿海围垦工程规划建设过程中,海域水沙动力特征研究是工程实施可行性研究的基础,对围垦的规划和布局、实施步骤及海岸防护等具有重要意义。

江苏省近岸海域水沙过程的系统研究始于 20 世纪 80 年代初。在 20 世纪 80 年代初江苏省沿海海岸带和海涂资源综合调查的基础上,任美镠等<sup>[2-3]</sup>的研究取得了一些成果,不仅给出了辐射沙脊群形

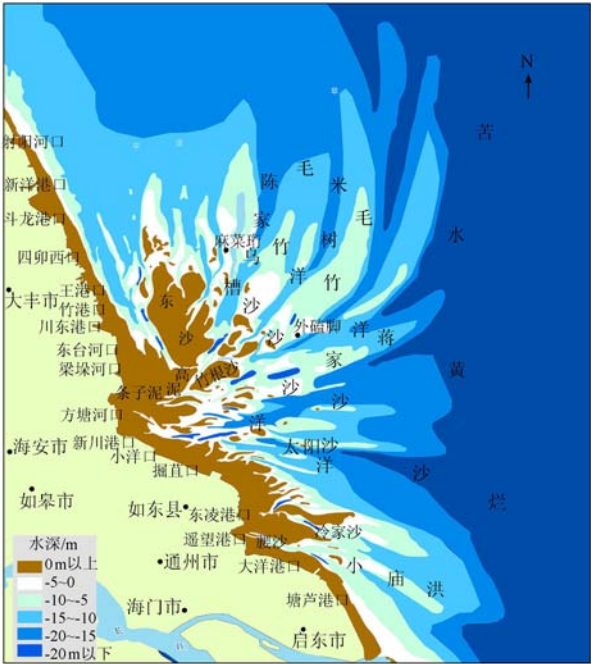


图 1 辐射沙脊群地貌形态

成必须具备的 3 个必要条件——大量的泥沙物质、类似海湾的特有环境、潮流辐合和辐散的水动力,并

由此详细给出了辐射沙洲形成发育的 6 个阶段,为进一步的深入研究指明了基本方向。此后,经过近 30 年的发展,众多学者分别利用不同的技术和方法从地质地貌、海洋水文、地理信息等方面开展辐射沙洲历史成因、物质来源、海平面变化影响、潮汐潮流动力特征等方面的研究。但由于影响因素多,动力条件复杂,辐射沙脊群泥沙输运、来源和输沙均衡问题长期以来一直是困扰学术界的难题,迄今尚未能有全面、科学的论断。已有的调查研究表明沙脊的物质主要来自于古长江、黄河三角洲沉积物,来自东南方的东海前进波与来自东北方的南黄海旋转波在此相遇形成的水动力场是沙脊群形成与演化的动力条件。但是,对于泥沙究竟从何而来;长江和黄河贡献了多少,贡献量是否持续;是否有远洋泥沙的输入,其量有多大;物源的变动特征如何等问题,目前还有待进一步开展研究。本文旨在总结现有研究成果,对辐射沙脊群外缘泥沙输运情况、现代辐射沙脊群沉积环境及物质来源进行探讨,提出需要进一步研究的问题。

## 1 辐射沙脊群形成的时间和物质基底

### 1.1 形成的时间

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,如研究潮波系统、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。

王建等<sup>[7]</sup>根据对 15 000 年以来 30 个典型时期的海岸线情况下的东中国海潮波系统进行数值模拟,认为大约距今 10 000 ~ 8 500 年前之间已经具备发育的动力条件。陈报章等<sup>[8]</sup>认为距今约 8 000 年前的冰后期海面上升,形成了河口湾形状, M2 系统潮波由旋转流变为往复流,古长江携带的泥沙发育为潮成沙堤。Li 等<sup>[9]</sup>认为距今 6 000 ~ 5 000 年前,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。张家强等<sup>[10]</sup>分析了苏北近代潮成沙体分布区的地层层序,认为苏北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距今 5 000 年前。张光威<sup>[11]</sup>通过对最接近潮流沙脊的 QC2 钻孔各项指标的分析和比较,并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 年前。杨子庚<sup>[12]</sup>在全新世海相层潮流沙脊的南部以南约 100 km、水深 31.7 m 处的海底发现贝壳砂层,其 <sup>14</sup>C 年代为 (2135 ± 220) 年。万延森<sup>[13]</sup>研究认为在 1 128 ~ 1 855 年的 727 年间,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。

由此可见,辐射沙脊群形成时间尚未能完全确定。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,在庞大的辐射沙脊群采样样本有限;以泥沙来源为依据的观点中,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,但辐射沙脊群是否在已经具备发育的动力条件时的 10 000 ~ 8 500 年前就具备了形成辐射沙脊群物质基底,这仍有待于研究。

### 1.2 物质基底

古时候中国沿海已有较高的泥沙供应率<sup>[14]</sup>。江苏省沿海主要有黄河、古长江和淮河入海。河流携带泥沙入海,在潮流、海流和波浪等动力作用下对泥沙进行搬运,或者洋流从外海带入海相泥沙,这些都可能成为形成辐射沙脊群物质基底的来源。

周长振等<sup>[15]</sup>通过分析砂体沉积物垂直分布特征,李成治等<sup>[16]</sup>通过对比矿物组合资料,黄易畅等<sup>[17]</sup>对比沙脊沉积物与黄河长江沿岸物质,认为辐射沙脊群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。Li 等<sup>[18]</sup>分析钻孔孔心和地表穿透剖面,认为辐射沙脊群沉积物早期来自古长江,后期来自黄河,还有海床冲刷物。Wang 等<sup>[1]</sup>分析重矿物和黏土矿物样本,认为辐射沙脊群沉积物主体来自古长江,北部物质来自黄河补给。汪亚平等<sup>[19]</sup>认为以蒋家沙为界,辐射沙脊群南北两翼沙洲体积差异反映了南北两翼黄河与长江供沙丰度的差异,古黄河泥沙主要供应北翼沙洲,古长江泥沙主要供应南翼沙洲。刘振夏<sup>[20]</sup>和夏东兴等<sup>[21]</sup>认为辐射沙脊发育在古长江、老黄河水下三角洲上,基底物质偏细,沟槽已下切至老水下三角洲基底,因而出现脊粗槽细的分布格局。

仲德林等<sup>[22]</sup>分析美国地球资源技术卫星多谱段相片,认为辐射沙脊群物质基础是古长江水下三角洲。傅命佐等<sup>[23]</sup>通过对江苏岸外海底沙脊群的沉积物的粒度、矿物和孢粉以及沉积结构、构造的分析研究,并与苏北废黄河水下三角洲、古长江水下三角洲、现代长江水下三角洲以及长江三角洲平原第四纪地层的沉积物进行对比分析,指出在距今 60 000 ~ 1 000 年前这一时期,古长江从江苏东台县新曹农场蹲门口至海底沙脊区一带入海,这就进一步证实了古长江为江苏岸外沙脊群提供了丰富的物质来源的可能性。

张光威<sup>[11]</sup>对钻孔样品进行测试,认为物质的来源应为黄河和淮河;杨长恕<sup>[24]</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,认为辐射沙脊群本身就是一个独立的巨大的潮成三角洲;赵松龄<sup>[25]</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,也认为辐射沙脊群是一个独立的“沙漠堆积体”。陈报章<sup>[26]</sup>对比较沉积学进行研究,认为辐射沙脊群是埋藏潮汐体的发展延续。尤坤元等<sup>[27]</sup>从辐射沙脊群研究区冲出的老壳发现,深槽海底泥沙来自沙洲底部的老沉积侵蚀。

万延森等<sup>[28]</sup>对江苏近岸海区所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,认为辐射沙脊群沉积物来源于各新老河流,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;张家强<sup>[10]</sup>和李从先等<sup>[29]</sup>根据地质雷达探测剖面的分析,认为末次冰期以来没有大河自苏北潮成沙体分布区入海的可能性,长江以及黄河入海泥沙以潮流作用下的沿岸搬运进入沉积区,成为两个主要物源,同时海底侵蚀源,淮河、射阳河入海泥沙也可能是补充物源。王建等<sup>[7]</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,认为辐射沙脊群沉积物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物质的混合物。

综上所述,对于辐射沙脊群形成的物质基底,研究者主要从形态特征或者沉积物的粒度、矿物组成等方面进行推测。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。笔者认为,辐射沙脊群形成的物质基底沉积物主要是古长江入海物质,辐射沙脊群上部沉积物主要是黄河带来的陆源物质,这一说法较为可信。由此推断南黄海陆架沙脊最早形成年代距今 4 000 ~ 6 000 年的可能性最大。

## 2 现代辐射沙脊群的物质来源

对江苏省沿海的大规模开发利用和围垦规划,朱大奎等<sup>[30]</sup>提出,根据目前江苏滩涂泥沙来源和数量,随着世界性海平面上升及江苏海域泥沙来源的逐渐减少,每年能围垦的数量将逐渐减少,对江苏滩涂资源及其利用,必须要有一个科学的、实事求是的认识。显然江苏沿海海涂资源的合理开发利用,需要在把握辐射沙脊群历史发展演变进程的前提下,探求现代辐射沙脊群海域泥沙输运、来源和输沙均衡问题,特别要探求现代辐射沙脊群外缘泥沙输运对辐射沙脊群的影响。关于现代辐射沙脊群的物质来源,主要有以下 3 种观点。

### 2.1 来源于废黄河三角洲

大多数的研究成果表明,现代辐射沙脊群物质部分来源于废黄河三角洲侵蚀<sup>[15-17,31-33]</sup>。以表层沉积物粒度级配与分布探究沉积物来源,表明沙脊组成主要是细砂,北部潮流通道(西洋)粉砂含量较南部多;南北向的西洋潮流通道内出现黏土沉积,黏土含量自外端(北)向内(南)骤减,反映来自北部海域废黄河三角洲的冲刷补给<sup>[32,34]</sup>。王嵘等<sup>[35]</sup>采用端元组分分析(EMMA)法对底质粒度进行分析,认为废黄河水下三角洲的粉砂质沉积向南扩散,已至东沙南部,辐射沙脊群北部近岸已由砂质沉积转变为砂质粉砂沉积。废黄河三角洲海域悬沙净输运方向为偏南向,与涨潮流向 SSE 基本一致,位于废黄河口南侧的输沙断面,在一个潮周期内悬沙向南净输运 48 万 t<sup>[36-37]</sup>。Zhou 等<sup>[38]</sup>最近的研究还给出了废黄河水下三角洲侵蚀对辐射沙脊群百年来的泥沙供应量,指出废黄河水下三角洲过去百年间年均侵蚀再悬浮泥沙约 7 亿 ~ 10 亿 t,主要向离岸黄海西部输运、向江苏沿海输运和向黄海中部至济州岛南部泥质区输运,其中 20% ~ 25% 的泥沙补给辐射沙脊群乃至长江口海域。

### 2.2 来源于现代长江口

关于长江口对苏北近海泥沙的供应,目前尚有不同的认识。

部分学者认为现代辐射沙脊群海域岸滩沉积受现代长江补给。沈焕庭<sup>[39]</sup>认为现代长江入海泥沙的北向影响范围可达琼港附近,而蒿枝港-启东嘴岸段所受影响尤为显著,该岸段海滩沉积中一些较易风化的碎屑矿物大多表面新鲜,某些重矿物如锆石、磁铁矿的质量比自南向北递减。Rao 等<sup>[40]</sup>利用元素地球化学示踪方法测定表层沉积物样本,认为长江口沉积物微量元素组成与江苏沿海沙脊群的微量元素组成接近,长江入海泥沙以及废黄河侵蚀再悬浮泥沙是辐射沙脊群最主要的泥沙补给源,长江口沉积物顺长江冲淡水流可直接北上补给辐射沙脊群区。王颖<sup>[32-33]</sup>根据卫星图片资料,认为长江口悬浮泥沙浊水流影响可达遥望港外海域。朱大奎等<sup>[41]</sup>认为黄河 1855 年北归注入渤海后,江苏沿岸失去黄河泥沙的直接供应,目前是黄河水下三角洲及水下堆积体的侵蚀为江苏滩涂提供部分沉积物。长江入海泥沙主要向南和东南方向运移,汛期入海径流有部分指向济州岛方向,其中约 10% 从长江口沿江苏海岸向北,在江苏岸外辐射沙脊群海域所做的大面积水文泥沙断面获得的基本数据为:从长江口沿江苏海岸北上的泥沙为 0.35 亿 t/a,东面来自长江水下三角洲的泥沙为 2.02 亿 t/a,来自北面废黄河水

下三角洲的泥沙为 1.09 亿 t/a,向 NE 方向输向外海的泥沙量为 1.60 亿 t/a。王嵘等<sup>[35]</sup>根据 EMMA 分析,认为长江泥沙堆积形成的长江三角洲沉积物向北扩散显著,但范围相对较小,沿岸仅达吕四海岸,而向东北方向扩散明显。

然而,也有研究者认为辐射沙脊群海域缺乏现代长江的补给,在苏北沿岸流参与下,江苏近海悬浮泥沙总体向南输运,可达长江口海域,成为长江口淤积泥沙的主要来源。王昕等<sup>[42]</sup>根据长江口及邻近海域 16 根重力柱<sup>210</sup>Pb 沉积速率的测试结果来探究现代长江入海物质扩散输运范围,认为辐射沙脊群整体沉积速率较低,缺乏现代长江物质供应。张振克等<sup>[43]</sup>根据<sup>137</sup>Cs 沉积速率变化情况,发现圆陀角——长江北支岸线与江苏海岸线交汇处,与辐射沙脊群南翼潮滩淤积速率一致,但小于长江口外泥沙沉积速率,认为苏北沿岸流携带的部分泥沙是圆陀角附近沉积的主要物质来源。Xing 等<sup>[44]</sup>从动力角度研究,发现辐射沙脊群海域泥沙有向岸滩以及向南往长江口地区净输移趋势,是长江水下三角洲的重要泥沙补给源。金翔龙<sup>[45]</sup>的研究表明,目前长江入海物质在陆架环流体系中的输运方向主要是向南,输往江苏海岸中部的物质相对较少。在对不断淤积的长江口北支泥沙来源的判别中,有一种观点是,苏北沿岸流挟沙南下,绕过苏北嘴进入北支,成为北支的重要泥沙来源<sup>[46-47]</sup>。但沈焕庭<sup>[39]</sup>认为长江口北支淤积泥沙的矿物组分与现代长江泥沙基本一致,而与黄河沙相去甚远,表明北支沉积物主要由长江本身补给,苏北沿岸流带来的物质甚微。

### 2.3 其他泥沙来源

关于现代辐射沙脊群物质来源,除认为来源于废黄河口水下三角洲再悬浮泥沙、长江入海泥沙外,还存有一些不同认识。Rao 等<sup>[40]</sup>认为现代黄河沉积物可随绕过山东半岛南下的黄海沿岸流到达辐射沙脊群区,韩国河流和济州岛输送到黄海中的少量沉积物在黄海环流作用下可补给辐射沙脊群很少量物质。“908”专项(我国近海海洋综合调查与评价专项)调查发现,辐射沙脊群总体上趋于蚀淤动态平衡,并未出现整体规模显著缩小或向岸迁移,事实上,辐射沙脊群外侧遗留着由古长江、古黄河相互堆积的古江河三角洲体,甚至“古扬子大三角洲体系”为其供给泥沙<sup>[48]</sup>。也有一些学者的研究认为,辐射沙脊群海域中心区域悬沙浓度最高,悬沙浓度由高至低向周围延伸,废黄河口三角洲海域以及夏季长江口海域同为悬沙浓度高值区<sup>[44,49-52]</sup>,近海再悬浮泥沙以及陆源物质是辐射沙脊群主要泥沙来源,而外海来沙量较少。故随着废黄河水下三角洲的夷

平,辐射沙脊群大量泥沙补给源断绝,目前辐射沙脊群的整体演变格局为外侧冲刷萎缩、中心淤积并陆<sup>[53-56]</sup>。张长宽<sup>[4]</sup>认为,由实测水文泥沙结果可知,废黄河三角洲侵蚀每年约有 1 亿 t 泥沙向南进入海底沙脊群区域;长江水下三角洲受侵蚀每年约有 2 亿 t 泥沙从苦水洋、黄沙洋和烂沙洋进入沙脊群区域;而沙脊群区域,每年有 1.6 亿 t 泥沙向 NE 从平涂洋向外输送<sup>[33]</sup>。与朱大奎<sup>[41]</sup>依据的 20 世纪 80 年代的江苏省海岸带和海涂资源综合调查资料不同,此实测资料来源于“908”专项的调查资料,其实测水文泥沙数据往往仅有一个潮或几个潮,是否能代表全年的情况,具体的泥沙输送量是否如此,还有赖于更多的实测资料来补充完善。

### 2.4 水动力对物质的输运作用

水体是物质输运的载体,水流流向对于物质迁移方向具有指示意义。关于南黄海环流结构的研究和认识,以往多基于温盐等资料的推断分析或数值模拟,长时间连续实测海流的研究很少<sup>[57-58]</sup>,特别是 40 m 水深以下(辐射沙脊群海域水深范围 0~25 m)的黄海沿岸流结构由于缺乏观测,且很少研究者对其特别描述,笼统地认为与黄海热盐环流流向一致,即由北向南流<sup>[59]</sup>。众多研究者<sup>[60-63]</sup>给出的黄海环流结构示意图均表明南黄海西侧沿岸流全年向南输运,且冬强夏弱。但 2007 年以来南黄海海域频发的浒苔绿潮,表明夏季南黄海近岸水体(表层流)存在向北输运的趋势,而风场驱动是北向流产生的主要原因<sup>[59,64-68]</sup>。

长江冲淡水具有冬季顺岸南下影响浙闽沿岸,夏季主体向东北方向扩展,最远可波及济州岛海域<sup>[69-71]</sup>的显著特征。而 Wu 等<sup>[72]</sup>认为长江冲淡水除上述 2 种扩展方式外,在东海前进潮波产生的北向斯托克斯余流和夏季盛行的南风控制下,夏秋季还存有小部分长江冲淡水沿江苏外海向北扩展,可达 33.5°N 处。

综上,关于废黄河口水下三角洲大量再悬浮物质可由南向流携带输运至辐射沙脊群进行沉积物补给的观点,研究者们基本一致,而对现代长江口入海泥沙能否补给辐射沙脊群尚有不同看法。也有学者曾提出长江和黄河物质向海输出部分有多少进入辐射沙脊群区的问题<sup>[33]</sup>,但这个问题目前尚无定论。

## 3 辐射沙脊群与长江口泥沙交换的最近研究成果

河海大学承担的“十二五”国家科技支撑项目课题对现代长江口入海泥沙能否补给辐射沙脊群进行了分专题研究,但由于问题复杂,专题组之间仍

存在不同认识。

### 3.1 江苏沿海物质输运的同位素地球化学示踪研究

饶文波教授的专题组于 2013 年 4 月初在山东黄河入海口、江苏废黄河口区域、条子泥区域、长江口附近采集了 31 个表层沉积物样品,同年 7 月份,在东沙沙脊采集了 31 个表层沉积物样品,采样点见图 2。对样品采用 Nd-Sr 同位素测定,结果表明,相对于现代黄河口,长江口和废黄河口沉积物的同位素组成更接近江苏沿海沙脊群的同位素组成,因此认为长江口和废黄河口可能给江苏沿海沙脊群提供了主要的泥沙物质,而现代黄河次之。基于沙脊群与潜在源区沉积物微量元素测定结果绘制 Th-Co-Zr/10 三角图,表明长江口样品与废黄河样品有部分重叠,长江口样品与废黄河口样品更接近,且根据 Zr/10 含量可以较好区分现代黄河、废黄河口、长江口沉积物。条子泥可能接受来自现代黄河、废黄河口、长江口的补给,长江口与废黄河的补给较多,现代黄河补给较少。长江口沉积物 Th-Co-Zr/10 元素的投影整个都在东沙范围内,这意味着东沙更多地可能来自长江携带泥沙补给,废黄河与现代黄河沉积物部分补给东沙。条子泥在图中的分布大部分在东沙范围,这暗示东沙与条子泥之间有很紧密的物质联系或有相同的物质来源。东沙沙脊群沉积物分布范围较广,可能其物质来源更为多样。



图 2 沉积物采样点位置

### 3.2 辐射沙脊群海域漂流监测

丁贤荣教授的专题组在 2014 年冬季于草米树洋的江家坞槽投放漂流瓶,采用 GPS 和北斗导航跟踪定位技术,记录下近 1 个月(28 天)的连续漂流轨迹,途经竹根沙、苦水洋、蒋家沙、黄沙洋、太阳沙、烂沙洋。漂流瓶轨迹(图 3)表明,辐射沙脊群表层余流存在由北向南的整体漂移特征,即由草米树洋,经竹根沙、苦水洋、蒋家沙、黄沙洋、太阳沙,到烂沙洋的漂移趋势与过程。该漂移特征与辐射沙脊群外围受苏北沿岸流由北向南的运移总体特征相吻合<sup>[60-63]</sup>。

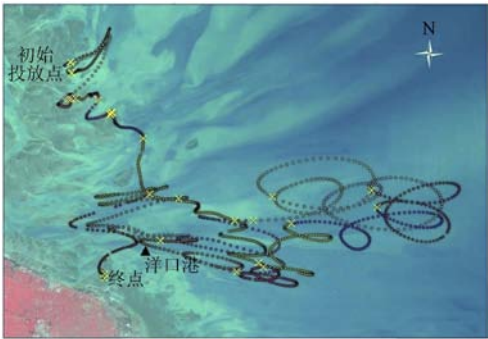


图 3 漂流瓶近 1 个月连续实测漂流轨迹

### 3.3 江苏沿海水体输运数值模拟示踪研究

笔者的专题组采用三维数学模型,经过 2006 年冬季的实测资料验证,于废黄河口外、西洋水道、陈家坞槽、黄沙洋、小庙洪水道以及蒿枝港外表层(图 4)、底层(图 5)各释放示踪粒子,反映辐射沙洲海域 1 个月水体输运特征,以水体输运方向指示泥沙输运方向。结果表明,辐射沙脊群区域水体运动易受到沙脊、深槽交错的地形约束,示踪粒子潮周期内以半封闭轨迹沿两条沙脊之间的水道主槽方向运动;在潮动力影响下冬季辐射沙脊群外缘水体总体由北向南净输运,伴有部分水体向岸净输运趋势。

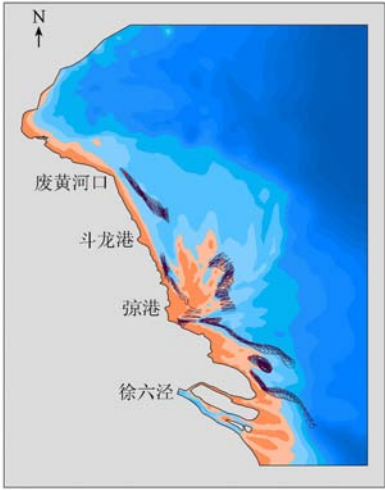


图 4 表层示踪粒子 1 个月运动轨迹

### 3.4 讨论

同位素地球化学示踪和微量元素测定结果表明,辐射沙脊群海域沉积受长江泥沙补给,长江泥沙有北上输运趋势。而漂流瓶监测以及数值模型模拟示踪粒子研究表明,辐射沙脊群海域水体具有向南输运趋势,在水流携沙作用下,由辐射沙脊群海域南下的悬沙可输运至长江口外海域。两者之间是有矛盾的。如果说漂流瓶和水动力示踪粒子表明悬浮泥沙从北向南输运,那是否可能由于波浪等动力作用下,底沙自南向北输移呢?由图 6 可以看出,由启东伸向外海的沙嘴明显由北偏南延伸,表明底沙也是由北向南输送的。在 20 世纪 80 年代的江苏省海岸

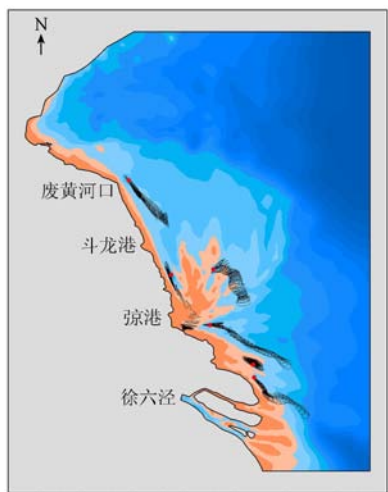


图5 底层示踪粒子1个月运动轨迹

带与海涂资源调查中,也曾经投放了3500个漂流瓶,回收了1179个,结果显示,冬季江苏沿海水体均向南,秋季总体也向南,夏季有向北的趋势,但不稳定,也有向南的,春季有以向北流动为主的趋势,在长江口投放的若干漂流瓶有用两个月时间漂至山东半岛的<sup>[2]</sup>。鉴于黄海沿岸流和江苏海岸沿岸流由北向南输运<sup>[60-63]</sup>,因而有可能漂流瓶出长江口后漂至外海,而后在台湾暖流或黄海暖流的作用下漂向北部。长江口的泥沙也许如文献[33]所述,是从苦水洋、黄沙洋和烂沙洋进入沙脊群区域的,因此关于辐射沙脊群与长江口泥沙交换方面还有许多问题需要深入研究。

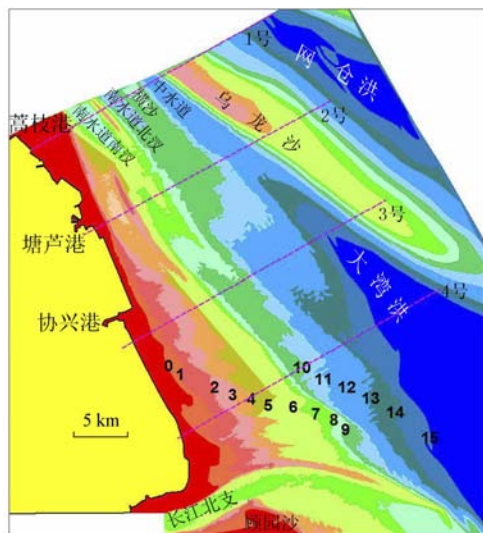


图6 2010年启东嘴实测水下地形

## 4 结 论

- a. 辐射沙脊群海域辐聚辐散型潮流场在至今10000~8500年前之间已经具备发育的动力条件。
- b. 随着古长江三角洲发育,海岸线向东推进,古长江河口南迁过程中向江苏南部沿海输入大量泥

沙,成为现在辐射沙脊群的基底。而黄河于1128年在苏北夺淮入海后,以潮动力为主导的海洋环境使得黄河入海泥沙成为辐射沙脊群上部沉积物主要陆源物质,加速了沙脊群发育。

c. 废黄河口水下三角洲的侵蚀是现代辐射沙脊群最主要的泥沙来源。

d. 现代长江口与江苏沿岸的泥沙交换仍未有确切统一的认识。

e. 北、东、南3个方向进出辐射沙脊群区的泥沙量级,仍有待进一步确定。

## 参考文献:

- [1] WANG Ying,ZHANG Yongzhan,ZOU Xinqing,et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea:origin by river-sea interaction [J]. Marine Geology,2012,291/292/293/294:132-146.
- [2] 任美镠.江苏省海岸带与海涂资源调查报告[M].北京:海洋出版社,1986.
- [3] 王颖.黄海陆架辐射沙脊群[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4] 张长宽.江苏省近海海洋环境资源[M].北京:海洋出版社,2013.
- [5] 苏政办发[2010]第109号 江苏沿海滩涂围垦开发利用规划纲要[S].
- [6] 张长宽,陈君,林康,等.江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):206-212. (ZHANG Changkuan, CHEN Jun, LIN Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2011,39(2):206-212. (in Chinese))
- [7] 王建,闫国年,林琚,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):95-108. (WANG Jian, LÜ Guonian, LIN Hui, et al. Developing process and mechanism of tidal sand ridges off the coast of Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science,1998,21(3):95-108. (in Chinese))
- [8] 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,1995,17(1):64-75. (CHEN Baozhang, LI Congxian, YE Zhizheng. Post-glacial deposition and environment evolution of the northern part of Yangtze River Delta [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995,17(1):64-75. (in Chinese))
- [9] LI Congxian,ZHANG Jiaqiang,FAN Daidu,et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu Coastal Zone, East China [J]. Marine Geology,2001,173(1/2/3/4):97-120.
- [10] 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,1999,21(2):65-74.

- (ZHANG Jiaqiang, LI Congxian, CONG Youzi. Producing condition and evolving process of the tidal sand bodies in the Northern Jiangsu and the Southern Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21 (2): 65-74. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHANG Guangwei. Formation and evolution of sand ridges in the South Huanghai Sea Shelf [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(2): 25-35. (in Chinese))
- [12] 杨子庚. 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. (YANG Zigeng. Sedimentology and environment in the South Huanghai Sea Shelf since late pleistocene [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5 (4): 1-19. (in Chinese))
- [13] 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. (WAN Yansen. The geomorphic development of radiating sand ridges in the Jiangsu Seashore[J]. Geographical Research, 1988, 7(2): 41-49. (in Chinese))
- [14] BERNE 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): 293-315.
- [15] 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. (ZHOU Changzheng, SUN Giasong. On the genesis of the shoal off North Jiangsu[J]. Marine Geological Research, 1981, 1 (1): 83-91. (in Chinese))
- [16] 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. (LI Chengzhi, LI Benchuan. Studies on the formation of Subei Sand Cays [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1981, 12(4): 321-331. (in Chinese))
- [17] 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, 1987, 9 (2): 209-215. (HUANG Yichang, WANG Wenqing. Study on dynamic mechanism of ridal sand ridge in the Jiangsu shore [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(2): 209-215. (in Chinese))
- [18] LI Congxian, ZHANG Jiaqiang, YANG Shouye, et al. Characteristic and paleoenvironmental evolution of subaerial tidal sand body in Subei Coastal Plain [J]. Science in China: Earth Sciences, 1999, 42(1): 52-60.
- [19] 汪亚平, 张忍顺. 江苏岸外沙脊群的地貌形态及动力格局[J]. 海洋科学, 1998 (3): 43-46. (WANG Yaping, ZHANG Renshun. Geomorphology responses on dynamics pattern of Jiangsu Offshore Sandbanks, Eastern China[J]. Marine Sciences, 1998 (3): 43-46. (in Chinese))
- [20] 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. (LIU Zhenxia. A study on the characteristics of grain size and deposition environment of the tidal current sand off Jiangsu [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 25-33. (in Chinese))
- [21] 夏东兴, 刘振夏. 我国邻近海域的水下沙脊[J]. 海洋科学进展, 1983, 1 (1): 45-56. (XIA Dongxing, LIU Zhenxia. The submarine sand ridges in China waters [J]. Advances in Marine Science, 1983, 1 (1): 45-56. (in Chinese))
- [22] 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. (ZHONG Delin, SHEN Xianzhong, XIA Dongxing, et al. Explanation of satellitic photography of the ancient Changjiang Delta region in early Holocene [J]. Marine Sciences, 1983(2): 16-17. (in Chinese))
- [23] 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. (FU Mingzuo, ZHU Dakui. The sediment sources of the offshore submarine sand ridge field of the coast of Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 1986, 22(3): 536-544. (in Chinese))
- [24] 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. (YANG Changshu. On the origin of Jianggang radial sand ridges [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(3): 35-44. (in Chinese))
- [25] 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 (03): 105-112. (ZHAO Songling. The latest study on origin of the North Jiangsu Shoal [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(3): 105-112. (in Chinese))
- [26] 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. (CHEN Baozhang. Discovery of the buried tidal sand bodies in Jiangsu area in Jiangsu Province and the cause of formation of the modern radiate sand ridges [J]. Marine Science Bulletin, 1996, 15(5): 46-52. (in Chinese))
- [27] 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. (YOU Kunyuan, WANG Ying, WANG Xueyu, et al. Foraminiferal distribution and its indications of sedimentation environment in the bottom sediments of radial submarine sand ridges along North Jiangsu [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 1998, 34(6): 650-654. (in Chinese))
- [28] 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. (WAN Yansen, ZHANG Qinian. The source and movement of sediment of radiating sand ridges off Jiangsu Coast [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1985, 16(5): 392-399. (in Chinese))
- [29] 李从先, 张家强, 杨守业, 等. 苏北陆上潮成砂体的特征和古环境演化[J]. 中国科学: 地球科学, 1998, 28 (5):

- 418-424. (LI Congxian, ZHANG Jiaqiang, YANG Shouye, et al. Characteristics and paleo environment evolution of tidal sand bodies off Northern Jiangsu [J]. Science in China: Earth Sciences, 1998, 28 (5): 418-424. (in Chinese))
- [30] 朱大奎, 王颖. 工程海岸学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [31] 张忍顺. 辐射沙洲与弥港海岸发育的关系[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1984 (2): 369-380. (ZHANG Renshun. Relation between changes of submarine sand ridge filed and development of coast near Jianggang, Jiangsu [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 1984 (2): 369-380. (in Chinese))
- [32] 王颖. 南黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [33] 王颖. 南黄海辐射沙脊群环境与资源[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [34] 王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学: 地球科学, 1998, 28 (5): 385-393. (WANG Ying, ZHU Dakui, ZHOU Lifu, et al. Sedimentary characteristics and evolution of radial sand ridges in South Yellow Sea [J]. Science in China: Earth Sciences, 1998, 28 (5): 385-393. (in Chinese))
- [35] 王嵘, 张永战, 夏非, 等. 南黄海辐射沙脊群海域底质粒度特征及其输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32 (6): 1-8. (WANG Rong, ZHANG Yongzhan, XIA Fei, et al. Grain size distribution and transportation trends of bottom sediments in the sand ridge field of the South Yellow Sea, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32 (6): 1-8. (in Chinese))
- [36] 周良勇, 陈斌, 刘健, 等. 江苏废黄河口外夏季悬浮泥沙运动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (6): 17-24. (ZHOU Liangyong, CHEN Bin, LIU Jian, et al. Observation of currents and suspended sediment concentration off Northern Jiangsu Coast, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29 (6): 17-24. (in Chinese))
- [37] 陈斌, 周良勇, 刘健等. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征[J]. 海洋科学, 2011, 35 (5): 73-81. (CHEN Bin, ZHOU Liangyong, LIU Jian, et al. The relationship between the suspended sediment movement and tidal current dynamic characteristic in Old Yellow River Delta [J]. Marine Sciences, 2011, 35 (5): 73-81. (in Chinese))
- [38] ZHOU Liangyong, LIU Jian, SAITO Y, et al. Coastal erosion as a major sediment supplier to continental shelves; example from the abandoned Old Huanghe (Yellow River) Delta [J]. Continental Shelf Research, 2014, 82: 43-59.
- [39] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [40] RAO Wenbo, MAO Changping, WANG Yigang, et al. Geochemical constraints on the provenance of surface sediments of radial sand ridges off the Jiangsu Coastal Zone, East China [J]. Marine Geology, 2015, 359: 35-49.
- [41] 朱大奎, 傅命佐. 江苏岸外辐射沙洲的初步研究. 江苏海岸带文集[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [42] 王昕, 石学法, 王国庆, 等. 长江口及邻近海域现代沉积速率及其对长江入海泥沙去向的指示意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38 (4): 763-775. (WANG Xin, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Sedimentation rates and its indication to distribution of Yangtze sediment supply around the Yantze (Changjiang) River estuary and its adjacent area, China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013, 38 (4): 763-775. (in Chinese))
- [43] 张振克, 李彦明, 孟红明, 等. 江苏圆陀角附近潮滩沉积岩芯粒度变化及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28 (4): 690-694. (ZHANG Zhenke, LI Yanming, MENG Hongming, et al. Grain size and its environment significance of the core from the tidal flat at Yuantuojiang Point, Jiangsu Province [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28 (4): 690-694. (in Chinese))
- [44] XING Fei, WANG Yaping, 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, 291/292/293/294: 192-210.
- [45] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [46] 陈宝冲. 长江口北支河势的变化与水、沙、盐的输移[J]. 地理科学, 1993, 13 (4): 346-352. (CHEN Baochong. The change of the general form and the transport of the water, load, and salt in the north-branch of the Changjiang River Mouth [J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13 (4): 346-352. (in Chinese))
- [47] 蔡爱智. 长江入海泥沙的扩散[J]. 海洋学报, 1982, 4 (1): 78-88. (CAI Aizhi. Diffusion of sediments of the Changjiang River discharging into the sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4 (1): 78-88. (in Chinese))
- [48] 王颖, 邹欣庆, 殷勇, 等. 河海交互作用与黄东海域古扬子三角洲体系研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32 (6): 1055-1064. (WANG Ying, ZOU Xinqing, YIN Yong. Study on river-sea interaction and formation of paleo-Yangtze Grand Delta system in the area of South Yellow Sea and East China Sea [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32 (6): 1055-1064. (in Chinese))
- [49] 黄惠明, 王义刚, 尚进, 等. 冬季苏北辐射沙洲水域悬沙分布及输运特征分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39 (2): 201-205. (HUANG Huiming, WANG Yigang, SHANG Jin, et al. Distribution and transport characteristics of suspended sediment in winter water areas of radial sand ridges in Northern Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39

- (2);201-205. (in Chinese))
- [50] 宋召军,黄海军,刘芳. 南黄海辐射沙洲附近海域悬浮泥沙的遥感反演研究[J]. 高技术通讯,2006,16(11): 1185-1189. (SONG Zhaojun, HUANG Haijun, LIU Fang. Remote sensing retrieval of suspended sediment near radial sand ridges area in the South Yellow Sea [J]. Chinese High Technology Letters, 2006, 16(11): 1185-1189. (in Chinese))
- [51] 宋召军,黄海军,杜廷芹,等. 南黄海辐射沙洲附近海域悬浮体的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2006,26(6): 19-25. (SONG Zhaojun, HUANG Haijun, DU Tingqin, et al. Suspended sediment near radial sand ridge area in the South Yellow Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(6): 19-25. (in Chinese))
- [52] 邢飞,汪亚平,高建华,等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. 海洋与湖沼,2010,41(3): 459-468. (XING Fei, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Seasonal distribution of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu Coastal Sea [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 459-468. (in Chinese))
- [53] 陈可锋,陆培东,王艳红,等. 南黄海辐射沙洲趋势性演变动力机制分析[J]. 水科学进展,2010,21(2): 267-273. (CHEN Kefeng, LU Peidong, WANG Yanhong, et al. Hydrodynamic mechanism of evolvement trends in radial sandbank of South Yellow Sea [J]. Advance in Water Science, 2010, 21(2): 267-273. (in Chinese))
- [54] 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. (ZHANG Renshun, LU liyun, WANG Yanhong. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China [J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 469-478. (in Chinese))
- [55] 陈橙,王义刚,黄惠明,等. 潮动力影响下辐射沙脊群的研究进展[J]. 水运工程, 2013(8): 17-24. (CHEN Cheng, WANG Yigang, HUANG Huiming, et al. Advancement in impacts of tidal dynamics on radial sand ridges [J]. Port & Waterway Engineering, 2013(8): 17-24. (in Chinese))
- [56] 黄海军. 南黄海辐射沙洲主要潮沟的变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 1-8. (HUANG Haijun. Change of tidal channels of radial sand ridges in the South Yellow Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(2): 1-8. (in Chinese))
- [57] 李峤. 中国东部近海夏季环流特征及其动力机制[D]. 北京:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [58] 韦钦胜,于志刚,冉祥滨,等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质输运的影响[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156. (WEI Qinsheng, YU Zhigang, RAN Xiangbin, et al. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transport [J]. Advance in Earth Science, 2011, 26(2): 145-156. (in Chinese))
- [59] 刘志亮,胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 1-7. (LIU Zhiliang, HU Dunxin. Preliminary study on the Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(2): 1-7. (in Chinese))
- [60] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-16. (SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 1-16. (in Chinese))
- [61] 郭炳火. 黄海物理海洋学的主要特征[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 7-18. (GUO Binghuo. Major features of the physical oceanography in the Yellow Sea [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1993, 11(3): 7-18. (in Chinese))
- [62] 林葵,汤毓祥,郭炳火. 黄海、东海表、上二层实测流分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(2): 9-19. (LIN Kui, TANG Yuxiang, GUO Binghuo. An analysis on observational surface and upper layer current in the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(2): 9-19. (in Chinese))
- [63] ZHENG Quanan, FANG Guohong, SONG Y T. Introduction to special section: dynamics and circulation of the Yellow, East, and South China Seas [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C11): C11S01.
- [64] 乔方利,王关锁,吕新刚,等. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比[J]. 科学通报, 2011, 56(18): 1470-1476. (QIAO Fangli, WANG Guansuo, LÜ Xingang, et al. Drift characteristics of green macroalgae in the Yellow Sea in 2008 and 2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(18): 1470-1476. (in Chinese))
- [65] QIAO Fangli, WANG Guansuo, LÜ Xingang, et al. Drift characteristics of green macroalgae in the Yellow Sea in 2008 and 2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(21): 2236-2242.
- [66] 衣立,张苏平,殷玉齐. 2009 年黄海绿潮浒苔爆发与漂移的水文气象环境[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(10): 15-23. (YI Li, ZHANG Suping, YIN Yuqi. Influence of environment hydro-meteorological conditions to enteromorpha prolifera blooms in Yellow Sea, 2009 [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2010, 40(10): 15-23. (in Chinese))
- [67] SON Y B, CHOI B J, KIM Y H, et al. Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and Lagrangian transport simulations [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 21-33.

(下转第 88 页)

- of concrete dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(2): 15-18. (in Chinese))
- [7] 朱伯芳, 张国新, 贾金生, 等. 混凝土坝的数字监控: 提高大坝监控水平的新途径[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 130-136. (ZHU Bofang, ZHANG Guoxin, JIA Jinsheng, et al. Numerical monitoring of concrete dams: a new way for improving the safety control of concrete dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 130-136. (in Chinese))
- [8] 刘毅, 张国新, 王继敏, 等. 特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 33-37. (LIU Yi, ZHANG Guoxin, WANG Jimin, et al. Numerical monitoring methods and system for construction of super high arch dam and its engineering practice [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 33-37. (in Chinese))
- [9] 张国新, 张磊, 刘毅, 等. 锦屏一级拱坝施工期工作性态反演仿真分析[C]//陈云华. 流域水电开发重大技术问题及主要进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2014: 225-231.
- [10] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 20-27. (MA Hongqi, ZHONG Denghua, ZHANG Zongliang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(12): 20-27. (in Chinese))
- [11] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 48(7): 1027-1034. (ZHONG Denghua, LIU Donghai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rock fill dam [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 48(7): 1027-1034. (in Chinese))
- [12] 马洪琪. 糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝质量控制关键技术[J]. 水力发电, 2012, 38(9): 12-15. (MA Hongqi. Key technologies on construction quality control of rock fill dam with core wall filled by clay soil mixed with gravel in Nuozhadu Hydropower Station Project [J]. Water Power, 2012, 38(9): 12-15. (in Chinese))
- [13] 张国新, 刘有志, 刘毅. “数字大坝”朝“智能大坝”的转变: 高坝温控防裂研究进展[C]//贾金生, 陈云华. 水库大坝建设与管理中的技术进展: 中国大坝协会 2012 学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 74-84.
- [14] 李庆斌. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146. (LI Qingbin. Demonstration on intelligent dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 139-146. (in Chinese))
- [15] 张国新, 刘毅, 李松辉, 等. 混凝土坝温控防裂智能监控系统及其工程应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 96-102. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LI Songhui, et al. Intelligent monitoring and control system for temperature control and crack prevention of concrete dam and its engineering application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(1): 96-102. (in Chinese))
- [16] 谭恺炎, 陈军琪, 燕乔, 等. 大体积混凝土冷却通水数据自动化采集系统研制及应用[C]//贾金生. 水库大坝建设与管理中的技术进展: 中国大坝协会 2012 学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 502-507.
- [17] 张国新. SPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用[J], 水利水电技术, 2013, 44(1): 31-44. (ZHANG Guoxin. Development and application of SPTIS: a software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 31-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-06-24 编辑: 骆超)

(上接第 67 页)

- [68] 左军成, 徐珊珊, 石少华, 等. 东中国海环流对 2008 年浒苔事件的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 561-568. (ZUO Juncheng, XU Shanshan, SHI Shaohua, et al. Impact of East China Sea current on algal bloom in 2008 [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(5): 561-568. (in Chinese))
- [69] 朱建荣, 肖成猷, 沈焕庭. 夏季长江冲淡水扩展的数值模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20(5): 13-22. (ZHU Jianrong, XIAO Chengyou, SHEN Huanting. Numerical model simulation of expansion of Changjiang diluted water in summer [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(5): 13-22. (in Chinese))
- [70] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183-206. (MAO Hanli, GAN Zijun, LAN Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing progress [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1963, 5(3): 183-206. (in Chinese))
- [71] 赵保仁. 长江冲淡水的转向机制问题[J]. 海洋学报, 1991, 13(5): 600-610. (ZHAO Baoren. Diversion mechanism of Yangtze diluted water [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 13(5): 600-610. (in Chinese))
- [72] WU Hui, SHEN Jian, ZHU Jianrong, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast [J]. Continental Shelf Research, 2014, 76: 108-123.

(收稿日期: 2015-06-30 编辑: 彭桃英)