# 基于数值模拟与统计学方法的南黄海近岸沙脊与水道稳定性 评价

朱庆光1, 倪文斐2, 高建华1, 贾建军3,4, 杨 磊5,6, 龚绪龙5,6, 汪亚平1

 (1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. University of Maryland Center for Environmental Science, MD Cambridge 21613, USA; 3. 国家海岛开发与管理研究中心, 浙江 杭州 310012; 4. 国家海洋局第 二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 5. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 6. 国土资源部地裂缝地 质灾害重点实验室, 江苏 南京 210018)

> 摘要:以南黄海江苏岸外辐射沙脊群为对象,基于已验证的该区域沉积动力学数值模型模拟近 30 a (1979~2011年)的水下地形演化,计算辐射沙脊区域海底地形年际变化标准偏差,对沙脊和水道的地貌 稳定性进行定量评估。研究发现,地形变化标准偏差愈小,地貌愈稳定;标准偏差愈高,地貌愈不稳 定。定量地确定了南黄海辐射沙脊区域内沙脊与水道稳定性系数的时空分布,发现主要淤积区域位于 沙脊周围,近岸沙洲有淤高的趋势;主要侵蚀区位于水道,沙脊间水道逐渐冲刷加深,如西洋水道和 黄沙洋水道。本研究提出的基于海底地形年际变化标准偏差确定地貌稳定性评估方法,可为海岸陆架 地貌稳定性研究、区域资源开发和环境保护等提供参考。

关键词: 沙脊; 湖汐水道; 地貌稳定性; 数值模拟; 标准偏差; 南黄海 中图分类号: P737.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)08-0119-10 doi: 10.11759/hykx20151008005

江苏中部海岸外侧,发育有全球独特的辐射沙 脊群地貌体系,该体系南北长约 200 km,东西宽约 140 km(图 1),大体上以弶港为顶点、以黄沙洋为轴, 自岸向海成辐射状展开<sup>[1-2]</sup>。该区域内沙脊和深槽相 间分布,水深介于 0~25 m,部分沙洲在低潮时可露 出水面并与陆地相连,出露面积达 2 125.45 km<sup>2</sup>,形 成了广阔的岸外土地资源<sup>[3]</sup>。沙脊之间由潮汐通道分 隔,部分深槽水深条件优越,且地貌形态稳定,具备 了建立天然深水良港的条件。

20世纪90年代以来,由于社会经济发展的需要, 对于辐射沙脊群海域的研究主要集中在具有土地利 用价值的大型沙洲,以及近岸水深条件良好、具有工 程意义的潮流通道<sup>[4]</sup>。朱大奎和龚文平<sup>[5]</sup>通过实测水 文数据和地形演变分析对西洋水道的稳定性进行了 研究,发现西洋水道从 20 世纪 60 年代到 90 年代不 断冲宽刷深,处于冲刷状态。通过对跨度 10~30 a 不 同时期的实测海底地形对比和钻孔资料分析发现, 黄沙洋、烂沙洋、大洪水道整体比较稳定,局部存在 冲淤;小庙洪水道口门呈现北淤南冲的趋势<sup>[6-10]</sup>。倪 文斐等<sup>[11]</sup>对苦水洋水道的沉积动力特征进行了研究, 并通过历史海图资料与最新的水道地形的对比,进 一步探讨了苦水洋水道的地形演变过程及稳定性。 随着遥感技术的应用和发展,遥感观测技术手段在 沙洲和水道的地貌提取和演化趋势分析等方面也得 到了广泛应用。李海宇等<sup>[12]</sup>利用多期遥感影像和地 形资料对辐射沙脊区域 1980~1990 年的地形演变趋 势进行了定性分析。陈君等<sup>[13]</sup>利用多年遥感图像解 译和现场实测水文资料,对东沙的地形、沉积特征, 以及 30 a 来的演化趋势进行了分析。高敏钦等<sup>[14]</sup>建 立了辐射沙脊海域的水下数字高程模型,定量计算 了西洋水道和川腰港附近的冲淤变化。丁贤荣等<sup>[15]</sup> 结合遥感观测与地貌测量数据,研究了条子泥沙洲 主要潮沟迁移与近期的地形冲淤过程。Liu 等<sup>[16-17]</sup> 通过对遥感图片进行水边线提取的方法建立了东沙 的精细化数字高程模型,对东沙的地形演变进行了 定量化分析。

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(41376044); 中国地质调查局地质大调查 项目(1212011220005, 1212011014002)

<sup>[</sup>Foundation: Natural Science Foundation of China, No.41376044; China Geological Survey, No.1212011220005, No.1212011220002]

作者简介:朱庆光(1991-),男,广东韶关人,硕士研究生,从事海洋 沉积动力学研究, E-mail: zhuqg1991@163.com

# 研究论文・』 → ARTICLE

然而,目前对于江苏岸外辐射沙脊群海域沙脊 与水道稳定性的研究,仍主要集中在东沙、条子泥、 西洋等部分区域,沙脊与水道的稳定性评价,尚没 有可靠的评价方法。对于整个辐射沙脊系统而言,地 形实地测量艰难危险,投入成本大;遥感观测手段 虽然得到了长足的发展,但是受限于反演水深的能 力,对潮汐水道的稳定性评价仍存在一定误差。因此, 基于沉积动力学理论方法,借助遥感、历史海图对比 等手段,建立一套较为完整的沙脊-水道地貌稳定 性评价体系,对于该区域的海洋资源开发、环境保 护具有重要意义。本文利用已有的地形资料,建立 了江苏岸外辐射沙脊群地貌演化模型,通过模型输 出辐射沙脊区域 33 a 地形数据的时间序列,利用 Matlab 的统计分析功能,计算地形数据年际变化的 标准偏差,对沙脊和深槽的稳定性进行了定量分析 和评价。



Fig. 1 Map of the study area<sup>[1]</sup>

# 1 研究区概况

南黄海辐射沙脊群海域最主要的水动力因素是 潮汐,东海的前进潮波和黄海旋转潮波控制着该海 域的潮流场,并在弶港附近海域交汇,形成了具有 辐聚辐散形式的潮流运动<sup>[2]</sup>。该区主要为正规半日潮, 潮差分布以新洋港为界向南北增加,弶港至北坎一 带潮差最大,平均潮差在4m以上,为强潮海岸;其 两侧潮差在2~4m之间,属中潮海岸<sup>[18]</sup>。实测数据 和数值模拟结果显示该区潮流流速较强,平均流速 为 0.7~0.9 m/s,强流速有利于沙脊-水道地貌的形成 和改造<sup>[19]</sup>。

辐射沙脊的物质基底主要是全新世海侵以来的 古长江水下三角洲,1855 年黄河改道北归后废黄河 水下三角洲的沉积物在潮流作用下向沙脊群输运, 与南部现代长江沉积物一同成为沙脊群目前主要的 沉积物来源<sup>[20]</sup>。南黄海海区底质总体上以砂质粉砂 和粉砂质砂为主, 沉积物的类型主要有泥、粉砂、砂 质粉砂、粉砂质砂、砂五种类型<sup>[20]</sup>。近岸海域在强 烈的水动力作用下形成了终年存在的高悬沙浓度水 体, 悬沙浓度的季节变化明显, 冬季悬沙浓度最高, 整个海域平均悬沙浓度达 0.3 kg/m<sup>3</sup>, 其次为春季, 夏季最低, 平均值仅为 0.1 kg/m<sup>3[21]</sup>。

## 2 材料与方法

#### 2.1 数据来源

江苏岸外辐射沙脊区域水动力复杂,地形变化 剧烈,实地地形测量艰难危险且投入成本大,因而 通过传统手段获取该地区长时间的地形变化数据非 常困难。本文采用数值模拟方法,通过荷兰 Deltares 研究所开发的 Delft3D 水动力与沉积物输运数值模 拟工具,建立辐射沙脊区域的沉积动力学模型(图 2), 模拟计算了该海域 1979~2011 年的地貌演化过程,最 终获得该地区的地形变化时间序列。模型使用的原 始地形是基于 20 世纪 70 年代海军实际观测水深,海 司航保部所制的 1:25 万水下地形图(1979 年)进行 数字化、空间插值所得到,并校正到了平均海平面基 准面(85 高程)。

运用实测数据验证,结果表明该模型能够较准 确地模拟研究区域的水动力场和悬沙浓度场<sup>[22]</sup>。本 研究组 2011 年在苦水洋海域获得了高质量海底地形 数据,将模型输出的苦水洋地区 2011 年模拟地形与 实测地形进行对比,发现数值模型的结果与实测资 料较吻合<sup>[22]</sup>,最大误差为 5 m,平均误差在±2 m 以 内。因此,将数值模拟获得的整个南黄海辐射沙脊群 海域的海底地形作为最新一期的数据(图 3),可用于 地貌稳定性的分析和研究。



#### 2.2 地貌稳定性评价指标

标准偏差(standard deviations, std)是统计学上一 种量度数据分布离散程度的标准,用以衡量数据值 偏离算术平均值的程度。标准偏差越小,数据分布偏 离平均值就越少,反之亦然。将其应用到地形数据的 时间序列分析中,计算一定时间内地形数据分布的 标准偏差,可以反映地形数据随时间变化的稳定性。 若标准偏差越大,则地形数据偏离平均值的程度越 大,地形随时间波动的不稳定性增强;反之,标准偏 差越小,地形数据偏离平均值的程度越小,地形较 稳定,波动小。 利用已验证的江苏辐射沙脊群地貌演化模型, 逐年输出 1979~2011 年辐射沙脊区域的地形数据(图 3)。通过 Matlab 对输出的面状地形数据进行时间序 列的稳定性统计,利用软件内置 std 函数计算每个网 格点 33 a 地形变化的标准偏差 *S*(图 2)。

$$S = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2\right]^{\frac{1}{2}}, \ \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

其中, n 为统计年数, 取值 33; x<sub>i</sub> 为第 i 年的地形高程 值; x 为该点 33 a 地形高程平均值。将 2011 年的地 形数据与 1979 年的地形数据作差,将标准偏差根据 该点的净冲淤状况, 赋以正负号, 正值判定为淤积, 负值判定为冲刷, 最终以带符号的标准偏差作为地 貌稳定性指标。

## 3 结果

#### 3.1 沙脊-水道稳定性分级

利用 Matlab 对稳定性指标的分布进行统计,发现所有数据点均位于--10~10 之间,且 99%的数据位于--5.5~5.5 之间(图 4),分布在这个范围内的数据基本代表了整个辐射沙脊区域地貌演化的稳定性分布,故为了计算方便,将以标准偏差来衡量的稳定性指标的分级标准选取为--5.5~5.5 之间,并均匀划分为11 个等级。

通过 Matlab 软件对辐射沙脊地区地貌冲淤稳定 性作图,将统计得到的以标准偏差来衡量的冲淤稳 定性指标从-5.5~5.5等值分为11级:-0.5~0.5为0级, 处于地貌冲淤稳定状态;-0.5~-1.5为1级侵蚀; -1.5~-2.5为2级侵蚀;-2.5~-3.5为3级侵蚀;-3.5~ -4.5为4级侵蚀;<-4.5为5级侵蚀;0.5~1.5为1级 淤积;1.5~2.5为2级滤积;2.5~3.5为3级淤积; 3.5~4.5为4级淤积;>4.5为5级淤积(图5)。

#### 3.2 地貌演变及冲淤稳定性分析

整体来看,不同位置的水道-沙脊的演化趋势和 稳定性不尽相同,辐射沙脊地区淤积的范围要大于 冲刷的面积(图 5),主要的淤积区域分布在沙脊周围, 近岸主要沙洲有淤高的趋势;主要的侵蚀区分布在 水道中,沙脊间的主要水道逐渐冲刷加深,如西洋 水道和黄沙洋水道等;部分的侵蚀和淤积区域呈条 带状交替出现,在蒋家沙和烂沙洋近岸沙洲区域尤 为明显。



图 3 基于海图资料的 1979 年(a)和模型输出的 1990 年(b)、2001 年(c)、2010 年(d)南黄海辐射沙脊群海域的水下地形 Fig. 3 Underwater topography of the radial submarine sand ridge system in 1979 from sea charts (a) and in 1990 (b), 2001 (c),

and 2010 (d) from the model output in the southern Yellow Sea









西洋和小阴沙是整个辐射沙脊地区冲淤变化最 剧烈的区域(图 6), 西洋的稳定性等级为-5, 在这 32 a 的演化过程中发生了剧烈的侵蚀过程, 这与朱大奎 和龚文平<sup>[5]</sup>、黄海军等<sup>[23]</sup>的研究较为符合。西大港向 弶港方向冲刷延伸, 同时东大港也不断侵蚀加深, 东、 西大港之间的沙脊稳定等级为 5, 沿西洋向西北方向 迅速发育并淤高。小阴沙的稳定性等级也达到了 5, 淤 积明显, 尤其是靠近东沙的区域, 变化最为剧烈。

东沙的外围受到了轻微侵蚀,稳定等级-2~-1 之间,说明东沙的面积在减小,这与宋召军等<sup>[24]</sup>的 研究以及江苏"908"近海海洋综合调查与评价专项的 结果一致。几条主要的潮沟切割挖深在某些程度上 也影响着东沙的冲淤演变,东沙内缘区域存在稳定 性等级为1的斑状淤积。



Fig. 6 Geomorphological stability classification of the northern radial submarine sand ridge system

条子泥沙洲近 30 a 来冲淤剧烈,稳定性等级主要在-3~3 之间(图 7a),相对稳定区主要分布在弶港 近岸和二分水滩脊,冲淤格局呈现北冲南淤的特征, 外缘边滩相对冲淤活跃,这与丁贤荣等<sup>[15]</sup>通过遥感 与地面测量相结合的方法研究近 40 a 来条子泥的冲 淤演化得出的结论是一致的(图 7b)。



图 7 条子泥冲淤格局稳定性分级(a)以及冲淤空间分布<sup>[15]</sup>(b) Fig. 7 Erosion-siltation stability classification (a) and spatial distribution <sup>[15]</sup>(b) of Tiaozini sand bank

陈家坞槽和苦水洋均为轻微冲刷状态,稳定 性等级由外海到近岸从-1 减小到-2,说明越往近 岸方向冲刷程度越强,总体而言这两条潮汐通道 基本保持着稳定和畅通(图 8)。毛竹沙和外毛竹沙 在向海侧非常稳定,稳定性分级保持在 0,冲淤变 化非常小,但是随着近岸水深的减小,外毛竹沙



图 8 陈家坞槽和苦水洋冲淤稳定性分级

Fig. 8 Geomorphological stability classification of the Chenjiawu and the Kushuiyang Channels

的稳定性分级增加到 2 左右, 在近岸侧出现了较强的淤积。

位于辐射沙脊群南部的蒋家沙、河豚沙和太阳 沙是淤积比较剧烈的区域(图 9)。它们的稳定性分级 普遍分布在 2 左右,部分区域可到达 4,沙脊整体不 断淤高并向海生长。位于它们之间的几条潮汐水道 不断冲刷挖深,使得这 3 个沙脊出现了淤高变窄的 趋势。

黄沙洋整体的稳定性分级保持在-2 左右, 近 30 余年来不断冲刷变宽, 近岸段水道受到强烈侵蚀。烂 沙洋则较为稳定, 仅在北部区域出现了稳定性分级 为-1 的轻微冲刷, 整体冲淤基本平衡, 与邹欣庆等<sup>[9]</sup> 的研究结果较为吻合。



图》 抽剂少月针用即区域冲淤稳足住力效

Fig. 9 Geomorphological stability classification of the southern radial submarine sand ridge system

## 4 讨论

本研究通过建立江苏岸外辐射沙脊群地貌演化 数值模型,计算辐射沙脊区域地形数据年际变化标 准偏差,旨在建立该区域沙脊-水道冲淤稳定性评估 的分级标准和评价方法。结果表明,研究区主要的淤 积区域分布在沙脊周围,近岸主要沙洲有淤高的趋 势,小阴沙、蒋家沙、河豚沙和太阳沙淤积剧烈。在 东海前进潮波和黄海旋转潮波的控制下,涨潮流在 辐射沙脊区域占优势,细颗粒沉积物有向岸输运的 趋势<sup>[25]</sup>,因此在细颗粒物质不断供给的条件下近岸 沙洲和潮滩逐渐淤高。该区域内的侵蚀区则主要分 布在水道中,沙脊间的主要水道在潮流作用下不断 冲刷加深,尤其在潮流作用较强的区域,如西洋水 道和黄沙洋水道等,出现了强烈的冲刷和侵蚀。从结 果上看,地形数据年际变化标准偏差所确定的沙脊 与水道稳定性系数的空间分布,与辐射沙脊区域近 30 余年来的冲淤演化格局基本保持一致<sup>[5, 9, 15, 23-24]</sup>, 该方法用于辐射沙脊地貌冲淤稳定性的分级和评估 是比较可靠的。

相较于传统的仅计算单一冲淤变化所确立的地 貌稳定性评价方法,例如江苏"908"调查专项通过计 算 1979 年和 2006 年的地形冲淤评估辐射沙脊地貌 稳定性,本研究建立的年际变化标准偏差统计指标 充分考虑了长周期的地形变化,能够更准确、合理地 对大范围辐射沙脊地区的沙脊-水道稳定性进行评 估。但这种方法也存在一些不足之处,本文采用的地 貌演化数值模型所模拟的是 1979~2011 年辐射沙脊 地区自然条件下的地貌演化过程,并未考虑人类活 动对地貌演化造成的影响,围垦、港口建设、水产养 殖等大规模人类活动将会对当地的水动力条件和地 貌演化造成剧烈影响<sup>[15, 26-28]</sup>。在这类人类活动比较 频繁的区域,本文得到的冲淤稳定性分级可能与实 际情况存在出入,应当充分考虑人类活动的影响采 用更精细的手段进行局地评估。同时,本文针对的是 以潮汐为主要驱动力塑造下的近岸沙脊-水道冲淤演 化,并未考虑极端动力条件下的地貌过程,在江苏 近岸海域,台风引发的风暴潮对海岸沉积速率、沉积 结构与构造特征和地貌格局会产生重大影响<sup>[29]</sup>,破 坏地貌系统的稳定性。在未来的研究工作中,可将极 端动力条件下的地貌演化过程纳入稳定性评价中, 从而获得更为完善的辐射沙脊群地貌稳定性分布。

利用地形数据年际变化标准偏差评估近岸沙脊-水道地貌稳定性的方法,并不局限于本文所采用的 特定研究手段,通过遥感手段获取的 DEM、实地 GPS-RTK 测量的地形变化等都可采用这一方法进行 地形数据的统计分析,计算同一时间段内地形数据 年际变化标准偏差,获得地貌稳定性分级指标。通过 不同研究手段获得的稳定性分级指标间的比较和验 证,可以进一步合理地对该区域的地貌稳定性进行 评估。随着研究的推进和数据的不断积累,逐步建立 不同区域的地貌稳定性指标,最终纳入到统一的辐 射沙脊群地貌冲淤稳定性评价体系中(图 10)。



图 10 稳定性评价技术流程



虽然本研究是以辐射状沙脊系统地貌稳定性为

主要研究对象,但是通过地形数据年际变化标准偏 差统计指标评估地貌稳定性这一方法仍然适用于其 他沙脊系统,前提是必须有长期连续的逐年地形数 据来进行年际变化标准偏差的统计。今后也应该拓 宽研究范围,结合沉积动力学指标,应用到不同的 海岸地貌系统的稳定性研究中。关于如何运用沉积 动力学方法对海岸地貌稳定性进行评价,前人已有 不少研究,其中比较有代表性的是海底沙波迁移机 制<sup>[30]</sup>和潮汐汊道稳定性<sup>[31]</sup>研究,这类研究对象与沙 脊-水道地貌系统具有一定的相似性,今后可将地形 变化标准偏差统计指标与在这类地貌系统中建立的 沉积动力学指标相结合,进一步完善海岸地貌稳定 性的评价体系。

## 5 结论

采用地形数据年际变化标准偏差,对近岸沙脊-水道的地貌稳定性定量评估的方法是可行的。本文 利用已有的地形资料,建立了江苏岸外辐射沙脊群 地貌演化模型,通过 Matlab 的统计分析功能,计算 地形数据年际变化的标准偏差,定量地确定了江苏 岸外辐射沙脊区域内沙脊与水道稳定性系数的时空 分布。

地形变化标准偏差与沙脊-水道地貌稳定性的关系是:标准偏差愈小愈稳定,愈高愈不稳定。

辐射沙脊群主要的淤积区域分布在沙脊周围, 近岸沙洲有淤高的趋势,小阴沙、蒋家沙、河豚沙和 太阳沙淤积剧烈;主要的侵蚀区分布在水道中,沙 脊间的主要水道逐渐冲刷加深,如西洋水道和黄沙 洋水道。

#### 参考文献:

[1] 中国人民解放军海军司令部航海保证部.射阳河口 至吕四港海图[M].天津:中国航海图书出版社, 2001.

The Navigation Guarantee Department of Chinese Navy Headquarters. Seachart from the Sheyanghe River Estuary to Lüsi Port[M]. Tianjin: China Navigation Publications Press, 2001.

- [2] 任美锷. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社, 1986.
   Ren Meie. The Integrated Survey Report of Coastal Zone and Tidal Flat Resources in Jiangsu Province[M].
   Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [3] 张长宽. 江苏近海海洋综合调查与评价专项总报告[M].北京:科学出版社, 2011.

Zhang Changkuan. Special Report on Offshore Marine

Comprehensive Survey and Evaluation in Jiangsu[M]. Beijing: Science Press, 2011.

- [4] 张忍顺,陈才俊,曹琼英. 江苏岸外沙洲及条子泥并 陆前景研究[M]. 北京:海洋出版社. 1992. Zhang Renshun, Chen Caijun, Cao Qiongying. Shoal's Merging Prospect for Jiangsu Offshore Sand Banks and the Tiaozini Sand Bank[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.
- [5] 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.
  Zhu Dakui, Gong Wenping. Stability analysis of Xiyang Channel in submarine sand ridges of offshore of Jiangsu[J]. Marine Science Bulletin, 1994, 13(5): 36-43.
- [6] 蔡明理, 马仲荃. 江苏辐射沙洲潮汐通道建港可行性 初探-以黄沙洋为例[J]. 海岸工程, 1992, (3): 34-42. Cai Mingli, Ma Zhongquan. On the feasibility of port building in theareas of Jiangsu radial shoal using the tidal-channels, A case study of Huangsayang[J]. China Coastal Engineering, 1992, (3): 34-42.
- [7] 陈可锋,陆培东,喻国华.辐射沙脊小庙洪水道口门 形态演变及其水动力机制研究[J].中山大学学报(自 然科学版),2012,51(2):101-106.
   Chen Kefeng, Lu Peidong, Yu Guohua. Hydrodynamic mechanism of morphology revolution of the Xiao-

miaohong Tidal Channel in radial sand ridges, Jiangsu Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51(2): 101-106.

- [8] 朱大奎, 龚文平. 苏北岸外海底沙脊群内大洪水道的 稳定性分析[J]. 海岸工程, 1994, 13(4): 1-12.
   Zhu Dakui, Gong Wenping. Study of the stability of Dahong Tidal Channel in the North Jiangsu offshore submarine ridges[J]. China Coastal Engineering, 1994, 13(4): 1-12.
- [9] 邹欣庆,殷勇,马劲松. 烂沙洋稳定性研究[J]. 第四 纪研究, 2006, 26(3): 334-339.
  Zou Xinqing, Yin Yong, Ma Jinsong. The stability of the Lanshayang Channel[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 334-339.
- [10] 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.
   He Huachun, Zou Xinqing, Li Haiyu. Stability of major

tidal channel in radial submarine sand ridges system off Jiangsu Province[J]. Marine Sciences, 2005, 29(1): 12-16.

[11] 倪文斐, 汪亚平, 邹欣庆, 等. 南黄海辐射沙脊群苦 水洋海域的沉积动力特征及稳定性研究[J]. 海洋通 报, 2013, 32(6): 66-77.

Ni Wenfei, Wang Yaping, Zou Xinqing, et al. Study on the sediment dynamics and stability of the Kushuiyang Tidal Channel at radial sand ridges in the Southern Yellow Sea[J].Marine Science Bulletin, 2013, 32(6): 66-77.

[12] 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.

Li Haiyu, Wang Ying. Change detection and trend analysis of the present evolution in submarine sand ridges of South Yellow Sea supported by GIS & remote sensing[J]. Marine Sciences, 2002, 26(9): 61-65.

- [13] 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.
  Chen Jun, Wang Yigang, Zhang Renshun, et al. Stability study on the Dongsha Sandbanks in submarine radial sand ridges field off Jiangsu coast[J]. China Coastal Engineering, 2007, 25(1): 105-113.
- [14] 高敏钦, 徐亮, 黎刚. 基于 DEM 的南黄海辐射沙脊 群冲淤演变初步研究[J]. 海洋通报, 2009, 28(4): 168-176.
   Gao Minqin, Xu Liang, Li Gang. The study of scouring

and silting evolution of radiative sand ridge filed of the South Yellow Sea in support of DEM[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(4): 168-176.

- [15] 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.
  Ding Xianrong, Kang Yanyan, Ge Xiaoping, et al. Tidal flat evolution analysis using remote sensing on Tiaozini flat of the radial sand ridges[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 231- 236.
- [16] Liu Y, Li M, Cheng L, et al. Topographic mapping of offshore sandbank tidal flats using the waterline detection method: A case study on the Dongsha Sandbank of Jiangsu Radial Tidal Sand Ridges, China[J]. Marine Geodesy, 2012, 35(4): 362-378.
- [17] Liu Y, Li M, Zhou M, et al. Quantitative analysis of the waterline method for topographical mapping of tidal flats: A case study in the Dongsha Sandbank, China[J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 6138-6158.
- [18] 张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(3): 235-245. Zhang Renshun. Characteristics of tidal current and sedimentation of suspended load on tidal mud flat in Jiangsu Province[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1986, 17(3): 235-245.
- [19] 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- . 潮流运动平面特征[J]. 中国科 学(D 辑: 地球科学), 1998, 28(5): 403-410.
  Zhu Yuliang, Yan Yixin, Xue Hongchao. Hydrodynamic mechanisims investigation for the formation of radiative sand ridge filed of the South Yellow Sea-, Planar features of tidal current movement[J]. Science in China



(Series D), 1998, 28(5): 403-410.

- [20] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京:中国环境科 学出版社, 2002.
  Wang Ying. Radiative Sand Ridge Filed of the South Yellow Sea[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [21] 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 distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 459-468.
- [22] 倪文斐. 黄南黄海辐射沙脊群区水道-沙洲-潮滩体系的地貌动力过程模拟[D]. 南京:南京大学,2014. Ni Wenfei. Numerical simulation on the geomorphodynamics of tidal channel-sand ridge-tidal flat system in the Southern Yellow Sea[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [23] 黄海军,李成治. 南黄海海底辐射沙洲的现代变迁研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 640-645.
  Huang Haijun, Li Chengzhi. A study on the present evolution of submarine radial sand ridges in the Southern Yellow Sea using remote sensing images[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 640-645.
- [24] 宋召军,黄海军,王珍岩,等.苏北潮滩的近期变化 分析[J]. 海洋科学,2008,32(6):25-29.
  Song Zhaojun, Huang Haijun, Wang Zhenyan, et al. Spatial-temporal changes of tidal flats in North Jiangsu Province[J]. Marine Sciences, 2008, 32(6):25-29.
- [25] Zhang R. Suspended sediment transport processes on tidal mud flat in Jiangsu Province, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1992, 35(3): 225-233.
- [26] 何华春,施杨,殷勇,等.如东县紫菜养殖对潮滩地 貌的冲淤影响[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1161-1172.

He Huachun, Shi Yang, Yin Yong, et al. Impact of porphyra cultivation on sedimentary and morphological evolution of tidal flat in Rudong, Jiangsu Province[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1161-1172.

- [27] 吴小根,王爱军.人类活动对苏北潮滩发育的影响[J]. 地理科学,2005,25(5):104-110.
  Wu Xiaogen, Wang Aijun. Impacts of human beings' activities on North Jiangsu Tidal Flat[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 104-110.
- [28] 朱庆光, 冯振兴, 徐夏楠, 等. 围垦工程影响下的江苏弶港潮滩剖面的演化机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 3: 21-29.
  Zhu Qingguang, Feng Zhenxing, Xu Xianan, et al. Evolution of tidal flat profiles under the influence of land reclamation in Jiangsu Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 3: 21-29.
- [29] 任美锷, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸 的影响-以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第 四纪地质, 1983, 3(4): 1-24.
  Ren Meie, Zhang Renshun, Yang Juhai, et al. The influence of storm tide on mud plain coast, with special reference to Jiangsu Province[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 1-24.
- [30] 王伟伟, 阎军, 范奉鑫. 波流联合作用下的海底沙波 移动对海底底床稳定性影响的研究进展[J]. 海洋科 学, 2007, 31(3): 89-93.
  Wang Weiwei, Yan Jun, Fan Fengxin. The research situation of bed-form stability influenced by seabed sand wave migration under wave combined current conditions[J].Marine Sciences, 2007, 31(3): 89-93.
- [31] 高抒. 潮汐汊道形态动力过程研究综述[J]. 地球科 学进展, 2008, 23(12): 1237-1248.
   Gao Shu. Morphodynamic processes of tidal inlets: A review[J]. Advances in Earth Sciences, 2008, 23(12): 1237-1248.



# Evaluating the geomorphological stability of coastal sand ridges and tidal channels in the southern Yellow Sea using numerical simulation and statistical methods

# ZHU Qing-guang<sup>1</sup>, NI Wen-fei<sup>2</sup>, GAO Jian-hua<sup>1</sup>, JIA Jian-jun<sup>3, 4</sup>, YANG Lei<sup>5, 6</sup>, GONG Xu-long<sup>5, 6</sup>, WANG Ya-ping<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Center for Environmental Science, University of Maryland, Cambridge 21613, USA; 3. State Research Centre for Island Exploitation and Management, Hangzhou 310012, China; 4. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 5. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China; 6. Key laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210018, China; Oceanic, China)

Received: Oct. 8, 2015

Key words: sand ridges; tidal channels; geomorphological stability; numerical simulation; standard deviation; the southern Yellow Sea

Abstract: This study establishes a geomorphological evolution model for the radial sand ridge system off the Jiangsu coast. By calculating the standard deviation (std) of the inter-annual variability of terrain elevation data output from the model, a quantitative classification of geomorphological stability for the sand ridges and tidal channels is proposed. The relation between std and geomorphological stability shows that the higher the std is, the more unstable the landform is, and vice versa. The results indicate that the major siltation areas are around the sand ridges, especially some nearshore sand banks, while the areas of major erosion are in the tidal channels between the sand ridges (e.g., the Xiyang Channel, the Kushuiyang Channel). Based on the inter-annual variability shows potential for applicability and is significant to geomorphological research, regional resource exploitation, and environment protection on coastal continental shelves.

(本文编辑:李晓燕)