

年代际尺度海岸演化机制与动力—统计建模方法

李国胜^{1,2}, 廖和平²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 发展中长时间尺度的海岸演化预测方法与机理模型, 是目前国际海岸演化研究领域关注的焦点和最具挑战性课题。本文系统性地回顾了近半个世纪以来不同时间尺度海岸演化模式的研究发展历程和成果, 从动力机制和时间尺度两个方面对海岸演化机理模型存在的主要建模瓶颈问题进行了系统总结。通过对渤海湾西岸近一个半世纪以来海岸演化机制的初步分析, 提出了以泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候等要素作为年代际尺度海岸演化主要驱动因子, 基于驱动力概化与统计升尺度有机衔接的年代际尺度海岸演化机理模型的动力—统计建模方法框架新思路, 为推动海岸演化动力学理论体系和中长时间尺度海岸演化预测方法创新, 提供了重要科学依据和借鉴。

关键词: 海岸演化; 年代际尺度; 动力机制; 动力—统计方法; 机理模型

DOI: 10.11821/dljy201309004

1 引言

海岸演化具有复杂的多时空尺度过程, 不同时空尺度的海岸演化过程及动力机制存在显著差异, 相关研究的理论基础及技术方法也各不相同。因此, 所有海岸演化过程都面临着不同时空尺度下具有不同演化机制以及模型适用性的问题。一些小尺度过程中的重要影响因素在长期海岸演化过程中可能并不重要, 而一些在宏观尺度过程中可以忽略的影响参数或现象在小尺度海岸演化过程则可能起着重要的控制作用^[1-3]。例如, 宏观时间尺度(如地质历史时期)的海岸演化主要受海平面变化、地壳运动等大尺度的地质及气候变化等因素所控制, 潮汐、波浪等因素在宏观尺度海岸演化过程中往往可以忽略; 而微观时间尺度下的海岸演化过程则主要受短周期下的波浪、潮汐等动力因素所制约, 像地壳运动等此类要素在微观时间尺度海岸演化过程中的作用则基本可以不予考虑。

从时间尺度上讲, 海岸演化可以分为小尺度(小时-年)、中尺度(年-年代际)、长尺度(年代际-百年), 以及千年以上的宏观尺度变化过程等类型^[3-5]。在海岸演化的多个时空尺度上, 一般来说, 存在着“统计”和“动力”两类海岸演化预测方法和模型。宏观尺度的海岸演化过程通常采用地质统计学或地貌学等方法进行研究, 其局限在于难以准确刻画地形演化的物理过程和演化机制。小尺度过程的海岸演化则可以通过对物理过程(机理模型或过程模型)的初值计算, 实现地貌演化过程的模拟再现和机制分析。最近40余年来, 国内外建立了许多不同复杂程度的基于泥沙运动的海岸演化机理模型(即物理机制模型, 以下统称为“海岸演化模型”)。这些基于物理机制的海岸演化模型虽然可以比较有效地确定

收稿日期: 2012-08-29; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271026); 西南大学统计学一级学科博士点建设项目

作者简介: 李国胜(1963-), 男, 江苏常州人, 研究员。主要从事海岸海洋环境遥感及数值模式研究。

E-mail: ligs@igsnr.ac.cn

在短周期风浪作用下的泥沙运动过程和海岸地形变化,但是由于这些模型方法都是基于短时间尺度风浪作用周期下泥沙运动和地形变化的“真实性演变过程”描述,难以刻画中长时间尺度的海岸演化过程和机制^[1-2,6],导致这些模型大多不能进行中长时间尺度海岸演化过程的准确预测^[7-8]。而中长时间尺度(包括年-年代际中时间尺度以及年代际-百年长时间尺度,下同)的海岸演化过程,与这个时空尺度下的海岸泥沙收支关系以及近岸动力过程这两类重要控制性因素密切关联^[1-2]。由于该时间尺度下的动力过程包含了波浪、环流、潮汐、气候变化等多种动力要素,演化机制非常复杂。因此,科学理解年-百年时间的中长时间尺度海岸演化过程及其动力机制并建立其预测方法,已经成为现代国际海岸演化研究领域关注的焦点和最具挑战性课题^[1-2]。发展中长时间尺度的海岸演化预测方法与机理模型、揭示中长时间尺度的海岸演化机制,已经成为海岸演化研究领域迫切需要解决的关键科学问题之一。

2 年代际尺度海岸演化机理模型的进展与建模瓶颈问题

20世纪70年代,Wrigh & Thom首次提出了地貌动力学概念,并据此提出了海岸地貌过程在不同动力影响下的相互转化机理^[9]。近40余年来,长时间尺度的地貌演化研究取得大量丰硕的研究成果,其中地貌演化模型在刻画海岸演化机理方面发挥了重要作用,相继建立起了若干较为成熟的基于经验统计或基于地貌过程的河口海岸地形演化预测模型^[10-12]。与经典的长时间尺度地貌演化模式不同的是,短时间尺度的海岸演化模式研究由于海岸过程机制研究的不断深化以及动力学方法及悬沙输运模型的引入,而逐步发展成为动力地貌领域国际关注的前沿和热点。

海岸演化模型是基于沙量收支原理和近岸动力过程,可以数值模拟各种海岸结构、波浪环境以及边界条件下,小时间尺度海岸演化的一种重要模型手段。最近40余年来,国际学术界外建立了许多不同复杂程度的基于泥沙运动的海岸演化机理模型,包括1D模型^[13]、二维海岸剖面演化模型^[14]、非线性模型^[15]、二维混合模型2DH^[16]、三维模型Delft3D^[7]、二维垂直模式(2DV)和二维水平模式(2DH)耦合模型^[17-18]、岸滩剖面变化模型SBEACH^[19]、GENESIS海岸演化模型^[20]、准三维海滩蚀淤模型^[21]、Nline模型^[22]等。

海岸演化模型的数值模拟是依赖于对海岸封闭水深范围内沙量收支平衡关系的准确计算,即以近岸区域的波浪作用为基本动力,以海岸封闭水深范围内波浪作用下的泥沙掀起、扩散和输送等过程为研究对象,通过综合考虑波浪动力的不平衡输沙过程所形成的沙量收支关系对海岸演变的影响,计算由不平衡输沙所引起的海岸地形冲淤变化^[23-27],获得短时间尺度以及一定空间范围内的泥沙运动结果,以及相应的海岸侵蚀/沉积状态,从而实现海岸演化过程的定量刻画。由于海岸演化模型不同于水工模型、物理模型等,它不存在比尺效应等问题,改变模型参数很容易实现,因此,模拟结果可达到相当高的精度,其普适性和稳健性也得到了很大的发展和提高。在数值计算技术的支持下,广泛地应用于短时间尺度(小时~年)的海岸演化模拟和预测^[1-2,28-30]。

然而,由于近岸波浪的不平衡输沙过程(包括横向输沙和沿岸输沙)除了受泥沙粒径、岸滩坡度等外在因素影响外,其控制性因素主要是由风场变化所导致的波高、波浪周期、波峰角等波浪参数所控制,因此,这类模型方法都是基于对风浪作用周期下短时间尺度的泥沙运动和地形变化的描述,难以刻画大于风浪作用周期以上的中长时间尺度(如年代际

尺度)的海岸演化机制^[1]。在利用这类模型进行中长时间尺度海岸演化模拟时,如果简单地套用上述海岸演化模型,把主要适用于风浪作用周期的模型控制方程通过时间积分的方法叠代计算到年代际乃至更长时间尺度,来刻画泥沙收支及波流作用对中长时间尺度现代海岸演化影响的目的,即使计算能力可以做到,但计算所形成的累积误差也会使研究结果令人难以信服。因此,这类模型大多不能进行中长时间尺度海岸演化过程的准确预测^[7-8]。2003年,Hanson等对目前已有的20个不同类型的所谓季节-年代际尺度海岸演化模型进行了仔细对比分析和讨论,结果无一例外地表明,没有一个可以真正准确有效地模拟刻画出中长时间尺度的海岸演进过程^[2]。

为了解决这个问题,20世纪90年代以来,国内外一些学者通过对海岸演化模型控制方程的约减技术和模型概化等,尝试对这一问题进行了系列试验性改进^[32-34],提出了若干改进性模型计算方案。1997年,Reeve等在Pelnard-Considere提出的1D模型基础上,初次提出了基于动力—统计结合的海岸演化模型建模思路,并应用到英国沿海12年的海岸演化试验研究中^[35],为中长尺度海岸演化机理模型的拓展带来了新曙光^[36-37]。

3 渤海湾西岸年代际尺度现代海岸演化机制与特征

渤海湾西岸是我国平原海岸的典型发育地区,大量研究工作已经充分证明,渤海湾西岸地区的近现代海岸演化过程受到黄河入海泥沙输送和海洋动力要素两方面的影响和制约,泥沙收支及动力作用对年-年代际尺度的现代海岸演化起着关键性控制作用。但是,就渤海湾西岸地区的近现代海岸演化而言,在年代际时间尺度上,泥沙收支及动力作用等因素是如何控制和影响渤海湾西岸年代际海岸演化过程,目前还很难得出全面准确的定论回答。其中,采用什么样的技术方法建立海岸演化预测模型用以刻画年代际尺度的现代海岸变化,也是目前所面临的关键难题。因此,开展渤海湾西岸年代际尺度的现代海岸演化机理分析,无疑有助于科学认识渤海湾西岸现代海岸演变过程的复杂机制,推动中长时间尺度的海岸演化预测方法与机理模型的发展。

黄河自1855年6月由铜瓦厢决口夺大清河重归渤海,一个半世纪以来,黄河输沙一直影响着近现代黄河三角洲,以及渤海湾西岸和莱州湾等区域的海岸演化过程^[38-42]。尽管20世纪70年代以来,黄河下游河道连年断流,而且时间越来越长,造成黄河口来水来沙锐减,但一个半世纪以来渤海湾西岸的近现代海岸演化过程始终深受黄河巨大水沙通量输送的影响^[42-47],它们与渤海湾近岸动力过程相结合,共同塑造和控制了渤海湾西岸的近现代海岸发育演化过程。主要体现在:

(1)据统计^[48],黄河入海泥沙通量中,约1/3堆积在三角洲陆上部分,约2/3输送到了三角洲滨海区和渤海海盆,且从黄河河口向滨海区和渤海海域的年输沙量能力基本保持稳定^[49-51]。入海泥沙中扩散到远海区域的比例,尽管不同专家的估算有所差异,但可以肯定的是,除了大约70%左右堆积于河口三角洲地区,以及由于高混浊水沉积、异重流沉积作用等在水下三角洲区域发生堆积之外^[52-55],其余绝大部分细颗粒泥沙在环流作用影响下在渤海海域形成大尺度悬移输送。黄河入海泥沙的大尺度悬浮输送主要受人海水沙特性、尾间边界条件、海域动力状况以及海面风应力等因素影响^[56]。其中,海洋动力特别是环流(风海流+潮致余流)动力作用对黄河入海泥沙的大尺度输送发挥着极其重要的作用^[57-59]。单纯潮流作用下,黄河入海泥沙不能形成长距离输送^[57-61]。

(2)悬沙模型计算表明^[60-61],黄河入海泥沙的大部分悬浮泥沙在进入渤海后首先是向东南输向莱州湾,继而向东北、并再转向西方向的渤海湾输运,与地质调查所获得的结论^[62-64]基本吻合。1976年黄河改道前,河口位置在现代三角洲北部,黄河入海泥沙的一支以沿岸流方式流向西北,可影响到天津新港以北地区。1976年黄河改道后,在刁口河河口北侧地区由于浊度锋的存在,阻挡了入海泥沙向西扩散进入渤海湾西岸,导致黄河沿岸输沙主要向南流动进入莱州湾^[65-66]。虽然浊度锋的存在可能会导致北上沿岸流发生中断,阻挡黄河入海泥沙以沿岸流方式向西扩散,但黄河入海悬沙仍然可以在环流作用下在渤海海域作大尺度海域空间范围的悬移输送,最终进入渤海湾的泥沙通量约为黄河入海泥沙的5%~10%^[60-61],成为渤海湾西岸海岸演化的重要泥沙物质来源。

(3)在黄河重归渤海的近160年来,黄河入海水沙的长期波动变化与我国黄河流域夏季降水长期变化以及1949年后大规模的人类活动(建坝、水土保持等)密切相关^[67-72]。由于中国夏季降水与西太平洋副热带高压及东亚西风带环流形势有着密切关联^[73-74],导致了黄河流域的大部分降水呈现为周期性振荡^[75],使黄河入海径流及泥沙通量的长期变化具有周期性变化的显著特点^[76]。黄河入海径流及泥沙通量长期变化的多尺度特征研究表明,过去60年来,黄河入海水沙通量的长期变化具有显著的年代际尺度周期性变化特征,主导变化周期为12.67年(近似为13年)。且20世纪70年代之前年代际尺度变化显著,其后有所减弱,1976年是前后两阶段的时间分界线^[76]。由于这个特点,导致黄河入海泥沙的大尺度输送过程及其在渤海湾地区所形成的海岸系统泥沙收支,在年际波动(受环流输送影响)的基础上,同时具备了显著的年代际尺度周期性变化的特征。

(4)波浪动力是海岸演化中不平衡输沙(包括横向输沙和沿岸输沙)的最直接因素。由于我国东部地区的季风性质,渤海湾地区风应力场及其波浪场的长期变化会表现出以年为周期的季节性波动,因此,渤海海域地区的波浪起沙条件在年尺度上表现为季节性变化特征。在长期气候变化背景下,年-年代际时间尺度上的区域风应力场会随着气候变化作长期波动变化,而波高、波浪周期、波浪方向等参数的长期变化过程(即波气候变化)会随着风应力场的长期变化而变化,从而导致近岸波浪的不平衡输沙过程在长时间尺度上存在波动变化,最终导致海岸过程的长期变化^[77-80]。

通过以上分析不难发现,渤海湾西岸现代海岸演化过程受泥沙收支及海洋动力作用的双重控制。其中,渤海湾西岸海岸系统泥沙收支,既与黄河入海泥沙在渤海海域的大尺度环流输送有关,又与黄河入海泥沙通量多寡的长期变化密切关联,具有着年代际尺度周期性变化的特点。由于近岸波浪动力的不平衡输沙是导致现代海岸侵蚀/堆积及海岸演变的最直接动力,而长期气候变化背景下的波气候变化是影响渤海湾地区近岸波浪动力长期变化的主导因素之一,由此可见,渤海湾西岸地区的现代海岸演化过程,在黄河入海水沙通量长期变化背景下,由于泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等因素影响,不仅具有十分复杂的海岸演化动力机制,而且必定具有着年代际尺度周期性和阶段性变化的特征,是研究和建立年代际尺度海岸演化模型方法的理想场所。

4 渤海湾西岸年代际尺度海岸演化动力—统计方法建模的实现

动力—统计建模是利用统计分析手段约束和反演动力模型的形式及参数的一种建模方法,鉴于目前发展中长尺度的海岸演化机理模型所存在的主要建模瓶颈问题,笔者认为,

有效建立渤海湾西岸研究靶区年代际尺度海岸演化模型的关键是根据统计—动力建模方法的思路,在约束和反演海岸演化动力模型形式及参数的同时,将主要适用于风浪作用周期的模型控制方程可以升尺度到年代际乃至更长时间尺度,以刻画泥沙收支及波流作用对中长时间尺度现代海岸演化影响的目的。具体来说,就是要在分析中长尺度海岸演化驱动因素的基础上,找准海岸演化主导性驱动因子进行动力参数“概化和约束”,同时,以主导动力因子参量的“统计约减”方法实现海岸演化模型从短时间周期到中长时间周期的升尺度延展。针对泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等驱动因子对年代际海岸演化影响的基本特征,在渤海湾西岸地区,实现年代际尺度上海岸演化动力—统计建模的关键在于有效解决动力参数概化、时间推延升尺度以及动力模型的统计约束求解等问题。

4.1 动力概化与参数化方案问题

以少量具有代表性的边界条件去代替完全真实的自然条件序列,在短尺度海岸模型模拟中并非重要,但在年代际尺度海岸演化的构建中却极其关键。因此,如何将海岸演化机理模型中的驱动力要素合理概化十分重要。

鉴于泥沙收支及海洋动力作用对渤海湾西岸年代际尺度的现代海岸演化起着关键性控制作用,因此,以基于沙量收支平衡原理的海岸演化过程为例,演化模型可表述为^[22]:

$$\frac{\partial y_k}{\partial t} = \frac{1}{d_k} \left(\frac{\partial(q_x)_k}{\partial x} + \frac{\partial(q_y)_k}{\partial y} \right)$$

式中: x, y 分别为沿岸方向和垂直海岸方向的坐标, $k=1, 2, \dots, n$; y_k 是海岸等深线位置, t 是时间; q_x, q_y 分别是沿岸泥沙收支和横向泥沙收支。 d_k 是等值线间距, $d_k = z_{(k+1)} - z_k$ 。

上述模型中,作为海岸演化最重要控制性因子的各网格单元的泥沙收支状况,是由近岸波浪动力条件下的沿岸输沙和横向输沙过程,以及由环流作用所形成的黄河入海泥沙输送两部分耦合而成。因此,作为影响渤海湾西岸年代际尺度海岸演化过程最重要的控制性要素,海岸系统不平衡输沙(包括横向输沙和沿岸输沙)背景下的泥沙收支过程既包含了近岸波浪动力掀沙过程,也包括黄河入海泥沙在大尺度环流作用下向渤海湾西岸地区的输送。

4.2 时间周期的升尺度延展问题

年代际尺度海岸演化模型因其时间长度的特殊性,不可能以真实的自然条件输入模型计算,通常考虑以平均状态输入。鉴于黄河入海泥沙在渤海海域输送过程所形成的海岸系统泥沙收支,在年际波动(受环流输送影响)的基础上,同时具备了显著的年代际尺度周期性变化的特征,因此,可以考虑利用小波分析等方法提取黄河入海水沙通量的多尺度特征及其年代际尺度周期,并根据水沙通量的年代际尺度变化周期对过去多年来的入海水沙演变过程进行年代际尺度演变阶段划分,构建多个年代际变化周期阶段。

通过解析过去多年来黄河入海水沙通量的年代际尺度的周期性变化特征,将黄河水沙通量序列按照各个年代际变化周期阶段进行入海通量的年代际时间尺度统计,理清渤海湾西岸在不同年代际变化周期阶段的海岸系统泥沙收支关系。在此基础上,将泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等要素,采用各个年代际时间尺度多年平均统计的方法,建立这些要素在各个年代际变化周期阶段的时间序列,分别代入到模型计算过程中,以实现海岸演化模型参量从风浪周期到年代际尺度的推延。

4.3 动力模型的统计约束求解问题

对于上述示例所给出的基于沙量收支平衡原理的海岸演化模型,由于控制性因子泥沙

收支状况既包含了近岸波浪的动力掀沙,也包括黄河入海泥沙在大尺度环流作用下向渤海湾西岸地区的输送。因此,模型求解过程中,波浪掀沙与环流输沙的耦合可以考虑用离散化方法,用平行于海岸线方向的等值线和垂直于海岸方向的等距离线将海岸段落划分成若干独立的网格单元,分别计算平行于海岸方向各相邻单元的沿岸泥沙输送和净收支变化,以及垂直于海岸方向的横向泥沙输送和净收支变化。最后根据两个方向上的泥沙净收支总和来判断等值线的移动,从而判定海岸线的动态变化。

其中,风浪作用下的横向输沙和沿岸输沙过程,将以不同年代际变化周期阶段的波气候变化状态参量(多年逐月平均波高、波浪周期、波浪方向等)的统计平均值为基础进行估算,以实现海岸演化机理模型中波浪掀沙作用的时间尺度从风浪周期向年代际尺度的跨越。而对于黄河入海泥沙的大尺度环流输送,将以各个年代际变化周期阶段的黄河入海水沙的多年月平均径流量和泥沙量,代表各个阶段入海水沙通量的平均水平输入海洋模式中,计算各个阶段黄河入海泥沙向渤海湾西岸的泥沙输送。将其与风浪作用下的近岸不平衡输沙结果耦合之后估算出各个海岸系统泥沙收支单元的泥沙收支状况。

上述动力—统计方法建模框架关系如图1所示。通过模型参数概化、时间周期推延以及模型的统计约束求解等关键问题的解决,以沙量收支平衡原理为基础所建立的渤海湾西岸年代际尺度海岸演化模型,就可以实现对多时空尺度、不同水沙通量状况以及不同波气候变化情景下的海岸演化过程的动态模拟与对比,分析理清各种情景下海岸演化对泥沙收支及动力作用响应关系的脉络,并可以通过控制实验和诊断分析,实现准确把握和定量揭示泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等要素对渤海湾西岸年代际尺度海岸演化影响和驱动机制的目的。

动力模型的统计约束求解过程,一般需要有较多的样本(统计)数据支持。就渤海湾地区海岸演化而言,可以依赖上世纪以来渤海湾地区多期的大比例尺实测地形数据、多次海岸带地形地貌调查数据记录,以及多个时期的高几何分辨率遥感数据等,重建渤海湾西岸近数十年来高时空分辨率的海岸变化过程。

在此基础上,通过把海岸演化模型模拟获得的各个阶段的海岸演化结果与上述重建结果进行对比分析和定量评价,不仅可以检验海岸演化模型模拟结果的准确性,同时更为重要的是通过对大样本数据的统计约束求解,可以逐步提升动力—统计建模方法在年代际尺度海岸演化模型建模过程中的可行性、可靠性及其模型精度。

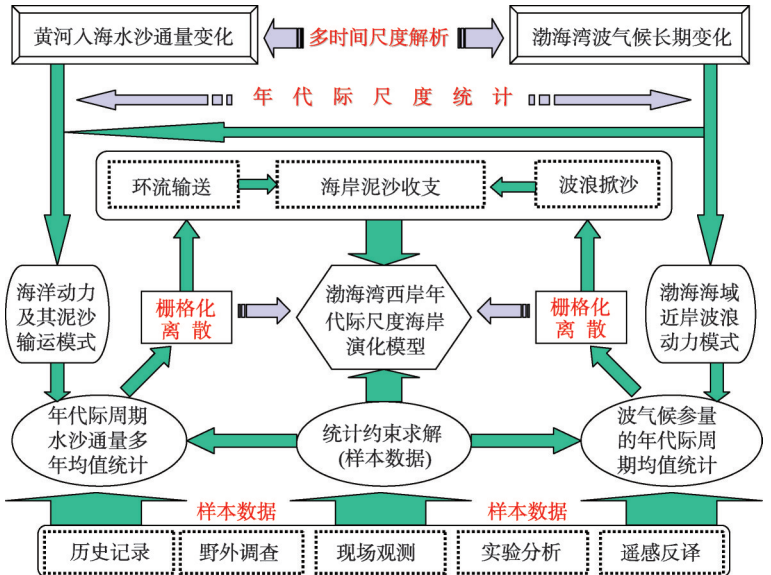


图1 渤海湾西岸年代际尺度海岸演化模型动力—统计方法建模框架

Fig. 1 Framework of modeling decadal time-scale coastal evolution by the dynamical-statistical approach

5 结论与讨论

近半个世纪以来,国内外建立了许多不同复杂程度的基于泥沙运动的海岸演化机理模型,仍难以刻画中长时间尺度的海岸演化过程和机制。目前,中长尺度海岸机理模型的研究存在以下尚未解决的主要问题:①不同海岸区域的中长时间尺度海岸演化机理和主导控制因素并不完全相同,使中长尺度海岸演化缺乏系统性的动力学理论体系;②各种在微小时间尺度下影响作用显著的一些动力要素在中长尺度海岸演化过程中的作用并不完全等同,致使中长尺度海岸演化过程的主导驱动因素与小尺度动力因子之间在中长尺度海岸演化模型中无法有机衔接;③由于升尺度建模技术的缺乏,适用于微小时间尺度的海岸演化模型无法真正推广应用到中长时间尺度的海岸演化过程模拟,使中长尺度海岸演化缺乏预测技术手段。

动力—统计建模是利用统计分析手段约束和反演动力模型的形式及参数的一种建模方法。渤海湾西岸地区的现代海岸演化过程受泥沙收支及海洋动力作用的双重控制,近一个半世纪以来,在黄河入海水沙通量长期变化背景下,受泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等因素影响,有着年代际尺度周期性和阶段性变化的显著特征,是研究和建立年代际尺度海岸演化模型方法的理想场所。本文提出了以泥沙收支、环流输送、波浪掀沙以及波气候变化等要素作为年代际尺度海岸演化主要驱动因子,基于驱动力概化与统计升尺度有机衔接的年代际尺度海岸演化机理模型的动力—统计建模新思路,以及在动力—统计建模方法支持下,实现渤海湾西岸年代际尺度海岸演化机理模型建模的新思路和完整框架及其主要技术步骤。

开展渤海湾西岸年代际尺度现代海岸演化建模研究,对于科学认识渤海湾西岸近现代海岸演变过程与机制、推动发展中长时间尺度的海岸演化预测方法与动力—统计模型研究无疑大有裨益,具有重要的理论和现实意义,必将为推动海岸演化动力学理论体系和中长时间尺度海岸演化预测方法创新发展,提供重要科学依据和借鉴。

参考文献(References)

- [1] Larson M, Kraus N C. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine Geology*, 1995, 126(1-4): 111-127.
- [2] Hanson H, Aarninkhof S, et al. Modelling of coastal evolution on yearly to decadal time scales. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(4): 790-811.
- [3] Schwarzer K, Diesing M, et al. Coastline evolution at different time scales-examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. *Marine Geology*, 2003, 194(1-2): 79-101.
- [4] Cowell P J, Roy P S, et al. Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 1995, 126(1-4): 45-61.
- [5] Stive M J F et al. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, 2002, 47: 211-235.
- [6] Niedoroda A W et al. Modeling shore-normal large-scale coastal evolution. *Marine Geology*, 1995, 126: 181-199.
- [7] De Vriend et al. Approaches to long-term modeling of coastal morphology: A review. *Coastal Engineering*, 1993, 21: 225-269.
- [8] French J R, Burningham. Coastal geomorphology: Trends and challenges. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33 (1): 17-29.
- [9] Wright L D, Thom B G. Coastal depositional landforms: A morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 1977(1): 412-459.
- [10] List J H, Terwindt J H J. Introduction: Large-scale coastal behavior. *Marine Geology*, 1995, 126: 1-3.
- [11] Maria G H, David E K. Influence of the geologic framework on spatial variability in long-term shoreline change, Cape Henlopen to Rehoboth Beach, Delaware. *Journal of Coastal Research*, 2003, 38(Special Issue): 147-167.

- [12] Wu C Y, Ren J, Bao Y et al. A long-term morphological modeling study on the evolution of the Pearl River Delta, and estuarine bays since 6000 yr BP. *Geol Soc Amer*, 2007, Special Paper: 199-214.
- [13] Pelnard-Considere. Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages desable et de galets. 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer III, 1956, 289-298.
- [14] Bakker W T. The dynamics of a coast with a groin system, Proc. 11th Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, N.Y., 1969, 492-517.
- [15] Walton T, Chiu T. A review of analytical techniques to solve the sand transport equation and some simplified solutions, Proc. Coast. Struc.' 79, ASCE, New York, N.Y., 1979, 809-837.
- [16] De Vriend H J. 2DH mathematical modeling of morphological evolution in shallow water. *Coast Eng*, 1987, 11(1): 1-27.
- [17] Briand, M G, Kamphuis J W. A micro-computer based Quasi 3-D sediment transport model. *Coastal Engineering*, 1990, 2159-2172.
- [18] Roelvink J A et al. Design and development of Delft3D and application to coastal morphodynamics. Proceedings of Hydroinformatics' 94 conference, Delft.1994.
- [19] Larson M, Kraus N C. SBACH: numerical model for simulating storm induced beach change: U.S. Army Corp@ of Engineers Technical Report CERC-89-9, 1989.
- [20] Hanson H. GENESIS - A generalized shoreline change numerical model. *Journal of Coastal Research*, 1989, 5(1): 1-27.
- [21] Dabees M A, Kamphuis J W. Online, a numerical model for shoreline change. *Coastal Engineering*, 1998: 2668-2680.
- [22] Dabees M A, Kamphuis J W. NLINE: efficient modeling of 3-D beach change. ICCE' 00 Sydney, Australia, 2000.
- [23] Grijm W. Theoretical forms of shoreline, Proc.7 th Coast. Engrg. Conf. ASCE, New York, N.Y., 1961, 197-202.
- [24] Larson M, Hanson H, et al., Analytical solutions of the One-line Model of shoreline change, Technical Report CERC-87-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 1987.
- [25] 曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟. *海洋学报*, 1993, 15(1): 107-118.
- [26] 张长宽. 基于长期波浪序列的沙质海岸演变数值模型. *河海大学学报*, 1994, 22(4): 1-7.
- [27] 窦国仁. 潮流和波浪的输沙能力. *科学通报*, 1995, 40(5): 443-446.
- [28] Hanson H, and Kraus N C. Genesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. CERC Report 89-19, U.S. Corps of Engineers, Vicksburg. 1989.
- [29] Kamphuis J W. Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE 117, 1991, 624-640.
- [30] Larson M, Hanson H, Kraus N C. Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 180-191. 1997 July/Aug.
- [31] Environment Agency. Characterization and prediction of large-scale, long-term change of coastal geomorphological behaviors: Final Science Report. SC060074/SR1, 2010.
- [32] De Vriend. Mathematical modeling and large-scale coastal behavior, Part 2: predictive model. *J Hydraulic Rec*, 1991, 29(6): 741-753.
- [33] Vrijling J K, Meyer G J. Probabilistic coastline position computations. *Coastal Engineering*, 1992, 17: 1-23.
- [34] Dong P, Chen H. Probabilistic predictions of time dependent long-term beach erosion risks. *Coastal Engineering*, 1999 (36): 243-261.
- [35] Reeve D E, Fleming C A. A statistical-dynamical method for predicting long term coastal evolution. *Coastal Engineering*, 1997, 30 (3-4): 259-280.
- [36] Gelfenbaum G, Roelvink J A, Meijs M, et al. Process-based morphological modeling of Grays Harbor inlet at decadal timescales. Proceedings of Coastal Sediments '03,2003.
- [37] Reeve D E, Spivack M. Evolution of shoreline position moments. *Coastal Engineering*, 2004 (51): 661-673.
- [38] 任美镠. 黄河的输沙量: 过去、现在和将来—距今15万年以来的黄河泥沙收支表. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 551-563.
- [39] 李凤林. 渤海沿岸现代海蚀研究: 环渤海地区现代海蚀机制、危害与对策. 天津: 天津科学技术出版社, 1996.
- [40] 王颖, 张永战. 人类活动与黄河断流及海岸环境影响. *南京大学学报*, 1998, 34(3): 257-271.
- [41] 王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁. *海洋地质与第四纪地质*. 1983, 3(4): 83-89.
- [42] 叶青超. 黄河三角洲地貌结构及发育模式. *地理学报*, 1982, 37(4).
- [43] 钱意颖, 叶青超, 周文浩. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993.
- [44] 恽才兴. 渤海湾典型岸段近岸过程研究. *中国工程科学*, 2001, 3(3): 42-51.
- [45] 姜义. 渤海湾西岸近百年海岸线变迁遥感分析. *国土资源遥感*, 2003(4): 54-58.
- [46] 王宏. 渤海湾泥质海岸带近现代地质环境变化研究(I): 意义、目标与方法. *第四纪地质*, 2003, 3(4): 385-392.

- [47] 黄海军. 黄河三角洲与渤、黄海陆海相互作用研究. 北京: 科学出版社, 2005.
- [48] 武桂秋, 夏东兴, 王文海. 现行黄河入海泥沙分布与海洋动力要素的关系. 海岸工程, 1994, 13(1): 24-30.
- [49] Pang J Z, Si S H. Fluvial processes of Huanghe River Estuary, II. Hydrographical character and the region of sediment silting. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(4): 295-305.
- [50] 曹文洪. 黄河河口海岸泥沙输移规律和演变机理及湿地变迁研究[D]. 中国水利水电科学研究院, 1999.
- [51] 胡春宏, 吉祖稳, 王涛. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散. 泥沙研究, 1996, 4: 1-10.
- [52] 杨作升. 现行黄河口水下三角洲海底地貌及不稳定性. 青岛海洋大学学报, 1990, 1.
- [53] 庞重光, 杨作升. 黄河口最大浑浊带特征及其时空演变. 黄渤海海洋, 2000, 18(3): 1-6.
- [54] 庞重光, 杨作升. 黄河口泥沙异重流的数值模拟. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 762-768.
- [55] 王厚杰, 杨作升. 黄河口泥沙输运三维数值模拟I: 黄河口切变锋. 泥沙研究, 2006(2): 1-9.
- [56] 董年虎. 黄河口清水沟流路泥沙淤积分布及扩散. 黄渤海海洋, 1997, 15(2): 33-37.
- [57] Li Guosheng, Wang Hailong, Liao Heping. Numerical simulation on seasonal transport variations and mechanisms of suspended sediment discharged from the Yellow River to the Bohai Sea, *J. of Geogr. Sci.*, 2010, 20(6): 923-937.
- [58] Li Guosheng, Xue Xinghua, Liuying, et al. Diagnostic experiments for transport mechanisms of suspended sediment discharged from the Yellow River in the Bohai Sea, *J. of Geogr. Sci.*, 2010, 20(1): 49-63.
- [59] 李国胜, 王海龙. 黄河入海泥沙悬移输送机制的敏感性试验研究. 地理研究, 2009, 28(3): 571-582.
- [60] 李国胜, 王海龙, 董超. 黄河入海泥沙输运及沉积过程的数值模拟. 地理学报, 2005, 60(5): 707-716.
- [61] 王海龙, 李国胜. 黄河入海泥沙在渤海中悬移输送季节变化的数值研究. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 129-137.
- [62] 秦蕴珊. 渤海地质. 北京: 科学出版社, 1985.
- [63] 董礼先, 苏纪兰, 王康塘. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系. 海洋学报, 1989, 11(1): 102-114.
- [64] 赵保仁, 庄国文, 曹德明. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473.
- [65] 邢焕政. 海河口岸线演变及泥沙来源分析. 海河水利, 2003(2): 28-31.
- [66] Ren Meie, Walker H J. Environmental consequences of human activity on the Yellow River and its delta. *Physical Geography*, 1998, 19(5): 429-430.
- [67] Ren Liliang, Wang Meirong, Li Chunhong et al. Impact s of human activity on river runoff in t he northern area of China. *Journal of Hydrology*, 2002, 261: 204-217.
- [68] Xu Jiongxin. The water fluxes of the Yellow River to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities. *Environmental Management*, 2005, 35: 620-631.
- [69] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Yoshiki Saito , et al. Stepwise decreases of t he Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005) : Impact s of climate change and human activities. *Global and Planetary Change* , 2007 (57): 331-354.
- [70] Ding Yanfeng, Pan Shaoming. Yellow River runoff changes and influencing factors during the last 50 years. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (5): 709-717.
- [71] Wang Houjie. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 302-313.
- [72] Xu Jiongxin. Temporal variation in summer monsoon intensity since 1873 and its influence on runoff in the drainage area between Hekouzhen and Longmen, Yellow River basin, China. *Climatic Change*, 2012, DOI: 10.1007/s10584-011-0225-3.
- [73] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Yoshiki Saito, et al. Inter annual and seasonal variation of the Huanghe water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams. *Global and Planetary Change*, 2006 (50): 212-225.
- [74] 赵振国, 蒋伯仁, 陈国珍, 等. ENSO事件与青藏高原积雪和东亚大气环流的可能联系. 山东气象, 1999, 19(4): 1-8.
- [75] 陈兴芳, 宋文玲. 近10年我国降水的QBO分析. 应用气象学报, 1997, 8(4): 469-476.
- [76] 王海龙, 李国胜. 近50年来黄河入海水沙通量变化的多尺度效应分析. 自然科学进展, 2006, 16(12): 1639-1644.
- [77] Sebastian D. Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes foe the Danube delta. *Marine Geology*, 2009 (262): 39-49.
- [78] Ruggiero P. Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. *Marine Geology*, 2010, 273(1-4): 127-140.
- [79] Zacharioudaki A, Reeve, D E. Shoreline evolution under climate change wave scenarios. *Climatic Change*, 2011, 108: 73-105.
- [80] Peter N A. Effects of climate change and wave direction on longshore sediment transport patterns in Southern California. *Climatic Change*, 2012, DOI: 10.1007/s10584-011-0317-0.

Modeling decadal time-scale coastal evolution of the western Bohai Bay by the dynamical-statistical approach

LI Guosheng^{1,2}, LIAO Heping²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Geographic Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Coastal evolution due to both natural and human-induced causes or factors can be variable over a wide range of different temporal and spatial scales. There are significant differences among evolution processes, influencing factors and dynamic mechanisms, as well as the different fundamental theories and technologies corresponding to the related scales. It is becoming a focus and the most challenging topic in the international field of coastal evolution research to scientifically understand coastal evolution processes and dynamic mechanisms at the macro and mega-time scales, but there is a lack of systematic theory study on the field. This paper reviews some conclusions and questions from the research content and method, and analyzes reasons of the limitation in the coastal evolution dynamic process model. On the basis of profoundly understanding of long-term changes of discharge and suspended load from the Yellow River to the Bohai Sea, and the deeply comprehending sediment budget in each coastal littoral cell of the western Bohai Bay and regional wave climate characteristics at different evolution phases in the recently 60 years, theories and methods of geomorphology, coastal morphodynamics and numerical modeling are comprehensively used in this paper to study the decadal time scale coastal evolution processes of the western Bohai Bay dominated by morphodynamic factors such as sediment budget, suspended sediment transport under the tide-induced and wind-driven residual circulations, wave climate change, sediment winnowing caused by wave etc. The objective of this paper is to explore the dynamical-statistical modeling for the decadal time scale coastal evolution with integration of statistically up-scaling and morphodynamic reduction and develop a decadal time-scale coastal evolution process model for the western Bohai Bay with integration of sediment budget and sediment winnowing caused by wave. Diagnostic experiments on coastal evolutions at different spatial and temporal time scales, discharge and suspended load flux and wave climate scenarios will be conducted to explore the responses of coastal evolution to sediment budget and coastal morphodynamics. Dynamic mechanisms and impacts of sediment budget, suspended sediment transport under the tide-induced and wind-driven residual circulations, sediment winnowing caused by wave and wave climate change on the decadal time-scale coastal evolution of the western Bohai Bay will be diagnostically analyzed. This would promote the innovative development on theoretical system and prediction approaches of coastal evolution morphodynamic mechanisms in the field of the macro- and mega-time scale coastal evolution research.

Key words: coastal evolution; decadal time scale; dynamic mechanism; dynamical-statistical approach; numerical modeling