

岬湾海滩沉积动力地貌研究

童宵岭, 时连强, 夏小明, 程 林

(国家海洋局第二海洋研究所国家海岛开发与管理研究中心, 杭州 310012)

摘 要:岬湾海滩是砂质海岸稳定性及其演变的重要内容。介绍了岬间海湾平面形态平衡模型、海滩平衡剖面模式、海滩剖面主要类型的判别以及海岸泥沙运动, 其中着重评述了现今岬间海湾平面形态平衡模型和海滩平衡剖面模式。通过它们的优缺点分析, 认为人工神经网络模型是未来新型平面形态模型改进的方向; 海滩平衡剖面模式分段使用, 亦或 2 种或多种模式配合使用, 更加符合实际情况。在以往研究中潮汐对海滩的影响往往被忽略, 所以应加强对潮控海滩的研究; 在泥沙输移方面至今还未有成熟系统的公式, 现有的公式假定成分多, 还有待进一步研究。提出了多学科综合集成是今后岬湾海滩研究的关键的思路。

关键词:岬湾海滩; 平面平衡形态; 平衡剖面; 海岸泥沙运动

中图分类号: P737.1 文献标识码: A

砂质海岸经常被自然岬角所分割, 并且当涌浪以一定角度抵达岸线, 这些砂质海岸在优势涌浪方向作用下将形成一种特殊形态——岬间海湾^[1]。它是全球岬角沉积海岸的一种重要地形, 约占全球岸线的 50%^[2]。岬湾海滩研究对全面认识岬湾海滩的动力地貌过程、结构以及控制因素有着重要意义。

1 岬间海湾平面平衡形态模型

由入射波浪的绕射和折射形成的岬湾海滩在海岸工程的早期便引起了大家的关注, 这种海岸地形被国外海滩研究者冠以如下名称: “ζ”形海湾、半心形海湾、对数螺线海滩、锯齿状海湾、弧形或钩状海滩、袋状海滩等^[3-8]。根据海滩稳定性特征岬湾海滩又可以分为^[9]: ①静态平衡海滩; ②动

态平衡海滩; ③不稳定海滩。由于静态平衡海滩是海岸的一种稳定形态, 因此, 运用岬间海湾静态平衡形态方程将是海岸管理与保护的一种最优的选择^[10]。

自 20 世纪 40 年代开始, 海岸科学家们为探讨海岸建筑对海滩的影响引入了经验函数去拟合现有的海滩, 以分析其稳定性。对数螺线形、双曲线形和抛物线形是现在应用广泛的平面平衡形态模型, 它们以静态平衡海滩理论为前提, 以实验室模型实验结果和现场实测资料为原型, 忽略了上游漂沙与湾内河流输沙, 认定岬间海湾满足封闭式体系特征, 并将岬间海湾分为遮蔽段和切线段 2 部分, 两侧岬角为起始点。

1.1 对数螺线形模型

Yasso^[5]使用对数螺线模型对海滩进行了模拟, 采用的坐标系为极坐标系:

$$R_2/R_1 = \exp(\theta \cot \beta) \quad (1)$$

式中: R_2 、 R_1 为任意两点的极半径;

θ 为 R_2 、 R_1 之间的夹角;

β 为对数螺线参数, 即波峰线和控制线的夹

收稿日期: 2011-06-13

基金项目: 海洋公益性行业科研专项资助 (200905008, 201005010)

作者简介: 童宵岭 (1987—), 男, 在读硕士, 主要从事河口海岸学研究工作。E-mail: inter0571@126.com

角(图 1)。

使用上岬角 B 作为极点,确定极轴时使其与入射波峰线平行。

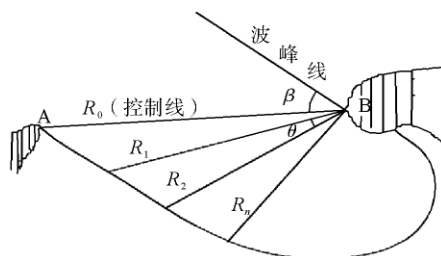


图 1 平衡海岸模型要素

Fig. 1 Model factors of an equilibrium beach

1.2 双曲线形模型

夏益民^[11]通过海湾平面平衡形态实验,发现平衡海湾在不同入射波角下的曲线形态有很大程度的相似性,由此得出了新的海湾平面平衡形态模型:

$$R^m \cdot \theta = K, \text{ 或 } (R/\alpha)^m \cdot (\theta/\beta) = 1 \quad (2)$$

式中: $m = \sqrt{2}$, 对于非极限平衡的可冲刷岸线, $m < \sqrt{2}$;

R 为其中一条极半径;

θ 为与 R 相对应之极角;

β 为控制线与入射波峰线间的夹角(图 1);

K 为常数, $K = \alpha^m \cdot \beta$;

α 为上下岬角 A、B 之间距离。

1.3 抛物线形模型

Hsu 和 Evans^[12]在对 27 个被大家认为处在平衡状态的海湾和理论试验模型海湾进行模拟之后,得出了抛物线模型:

$$R_n/R_0 = C_1 + C_2 \cdot (\beta/\theta) + C_3 (\beta/\theta)^2 \quad (3)$$

式中: R_n 为其中任意极半径;

θ 为与 R 相对应之极角;

R_0 为控制线长度;

β 为控制线与入射波峰线间的夹角(图 1)。

在对 27 个海湾做回归分析之后得到 C_1 、 C_2 、 C_3 , 它们的函数都与参数 β 有关:

$$C_1 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.0000875\beta^3 + 0.0000004765\beta^4 \quad (4)$$

$$C_2 = 0.9536 - 0.0078\beta + 0.00004879\beta^2 -$$

$$0.0000182\beta^3 + 0.000001281\beta^4 \quad (5)$$

$$C_3 = 0.0214 - 0.0078\beta + 0.0003004\beta^2 - 0.00001183\beta^3 + 0.0000009343\beta^4 \quad (6)$$

经历了几十年的发展,平面平衡形态模型也日趋发展成熟,其在海岸长期侵蚀演变预测与海岸防护工程中得到了广泛的应用^[13-15],成效显著,但在发展中也暴露出了一些不足。

对数螺线模型与实际的海岸形态偏离较大,其优点是对上岬角遮蔽段拟合效果不错,但在下岬角切线段的拟合与实际的海岸形态偏离较大,波浪入射角变小,则对数螺线模型的偏离变大^[12]。Rea 和 Komar^[7]认为改变对数螺线模型的中心位置可以改善其拟合效果。中心位置的不确定性使对数螺线很难在实际中应用,甚至是不可能^[11]。双曲线模型适合某些海湾,并已编入我国《泥沙手册》,其缺点是没有物理机制分析,没有考虑波浪绕射点的影响使得双曲线模型在理论与实际的对比上产生偏差。Oliveira 等^[16]通过分析葡萄牙大西洋海岸 42 个海滩的平面形态,认为对数螺线模型对海滩的弧线段拟合较好,尤其是对岬间小型海滩;双曲线模型对只有单岬角的海滩拟合较好。

抛物线模型是当前确定岬间海湾静态平面平衡形态使用最广泛的经验关系^[17-19],它考虑了上游岬角与波浪绕射的影响,最具工程价值^[20]。在 Silvester 和 Hsu^[1]进一步论证了抛物线模型的合理性后,抛物线模型在检验海湾的稳定性上得到了最广泛的应用。李志龙、陈子燊、于吉涛^[21,22]认为抛物线为 3 种模型中较为理想的模型,并运用此模型对华南岬间海湾的稳定状况进行了分析,指出其可以预测海滩的长期演变。Jackson^[23]运用抛物线模型分析和预测了爱尔兰北部的 9 个岬湾海滩,认为波浪绕射点确定困难、海滩的不均衡性(沉积物太少或太多)、海滩形态的地质控制这 3 方面将导致抛物线模型的预测与某些海滩的实际情况不一致。

所有这些模型都是在模型中嵌入一个特定的岸线方程,而对海湾为什么满足这样的函数关系却没有明确的解释。在讨论了目前平衡形态经验模型存在的这种不足后,李志龙等^[24]从沿岸输沙公式入手,以华南典型海湾为学习样本,建立了岸线平衡形态的神经网络模型,并通过模拟海湾与

实际海湾的对比分析,指出其所建神经网络模型较抛物线模型更为理想。

人工神经网络模型不同于传统的平面形态模型,因为它不需要假定海岸有一个特定的岸线方程,也不需要模型中嵌入这一特定的岸线方程,还可以从以往的例子中获取知识。这种学习能力可以使它贴上“智能”的标签^[25]。Iglesias等^[26]将人工神经网络模型与改进的抛物线模型进行对比,认为人工神经网络模型不仅有更低的标准均方差,而且不会显示那些比传统模型预测效果更差的趋势。由此可见,人工神经网络模型克服了传统模型的缺点,是未来新型模型改进的方向。

2 海滩剖面的形态

在特定的波浪和泥沙条件下可以形成一个长期保持稳定的海滩剖面形态^[27],海滩平衡剖面就是海滩长时间寻求平衡状态的终极结果,它无论在理论上还是实践上都是海岸工程研究中的重要内容。绝对意义上的、理想的平衡海滩剖面在自然界是难以找到的,而统计意义上的海滩平衡剖面可以满足海岸变化和海滩过程研究的需要^[28]。

关于海滩平衡剖面形态的研究有很长的历史,研究人员认为在整体上海滩剖面呈上凹光滑形态,向海距离增加时剖面坡度随之减少,粗粒物质在海岸近处沉积,细粒物质携带较远,多在较深海域沉积。于是他们试图采用数学表达式来描述其形态,如Dean(1991)、Bodge(1992)、Lee(1994)等均提出了他们自己的海滩平衡剖面模式。

2.1 Dean 模式

Dean^[29]以能量法为基础,假定沿海滩剖面每单位水体积上的波能消散恒定,并限制剖面向海到碎波带,得出波浪控制的近岸平衡剖面数学表达式:

$$h = Ax^m \quad (7)$$

式中: h 为当地水深(m);

A 为与当地泥沙沉速和波周期等环境条件有关的系数;

x 为离岸距离(m)。

Dean通过平衡条件①单位水体积等能量的衰减作用和②单位表面积等能量的衰减作用得

出,指数 m 的期望值在单位水体积等能量的衰减作用下是 $2/3$,单位表面积等能量的衰减作用是 $2/5$ 。

2.2 Bodge 平衡剖面模式

Bodge^[30]依照Ball运用新方法分析边缘波的思路,并给定 K 值在 $(3 \sim 1\,600) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 之间,得出了新的平衡剖面模式:

$$h = B(1 - e^{-Kx}) \quad (8)$$

式中: K 为经验系数,与海滩的上凹程度有关;

B 为经验系数,为海滩剖面在近岸坡度 S 无限接近0时的极限水深,量纲为 L 。

2.3 Lee 平衡剖面模式

Lee^[31]指出控制剖面形状的泥沙运移是矢量而与泥沙运移有关的波能是标量并非矢量,海底地形可能因泥沙和水体的随机扰动消耗了部分波能而没有变化。通过对柯氏效应分析,并限制剖面向海到浅水波范围内, Lee提出了与波要素相联系的动力解析模式:

$$\frac{dx}{dy} = KH_0 e^{\frac{2x}{L}} \quad (9)$$

对此微分方程变换与积分后得出:

$$x = A(e^{By} - 1) \quad (10)$$

式中: x 为离岸距离;

y 为水深;

H_0 为深水波高;

K 为经验系数,与海滩的上凹程度有关;

A 为与泥沙性质有关的剖面扩展系数;

B 为深水波数, $B = 2\pi/L$;

L 为深水波长。

Dean对海滩剖面模式的研究作了开创性的工作,其提出的指数模式简单明了,考虑了水深、泥沙粒径、破波指数、泥沙沉速和波周期因素,反映了海滩平衡剖面的基本形态,常用来判定剖面的稳定性,但是该模式的不足之处是没能把影响海滩剖面的一些重要因素考虑进去,例如潮汐对平衡剖面的影响、波候和海滩的波浪反射对剖面形态的影响等。对于那些影响海滩剖面的重要因素,Türker等^[32]认为沉积物粒径和入射波高对形态参数有很大影响,而波周期对其的影响可以忽略不计。对于波能Bernabeu等^[33]也有不同的

理解,他们认为海滩并没有完全消散入射波能,部分入射波能被海滩剖面反射到了更深的水体,而现今提出的海滩平衡剖面模式都不能充分反映出波能反射是怎样改变海滩剖面的。另外,Komar 等^[34]指出了 Dean 模式存在的问题:①通过量纲和谐性分析得出指数 m 应该为 $2/3$,而系数 A 的量纲应该是 $[L^{1/3}]$,系数 A 的物理意义不明确;②在变换方程(7)之后得到

$$S = \tan\beta = \frac{dh}{dx} = \frac{2}{3} = \frac{A}{x^{1/3}}$$

在 $x=0$ m 时,即在海岸线上时, S 趋于无穷大,可事实并非如此。现今的这些模式在分析岸线附近及海滩的近岸部分时都会产生一些问题,Wojciech Romańczyk 等^[35]将平衡剖面延伸到了海岸线,将形态函数和一个关于海滩近岸和水上部分的泰勒多项式结合起来,运用非线性拟合技术去估计模式的最佳参数值,以此来解决这一问题,成效显著。

其他剖面模式大多基于能量关系建立,这一类方法拥有很长的历史,也取得了一定成功。但是这些模式都没有涉及到具体的地形变化、破波或非破波情况下平衡剖面确立的基本物理机制和有关剖面形状性质的解释,并且海滩剖面形态复杂,不同区域的差异性也很大,只用一种模式来描述是很困难的。因此,模式分段使用,亦或 2 种或多种模式配合使用,更加符合实际情况。陈子燊^[36]在分析粤西后江岬间海湾重复地形剖面时,每条剖面分别使用 Bodge 模式和 Lee 模式,拟合效果良好。Bodge 模式和 Lee 模式的配合使用对了解大范围的现代海岸演变与环境动力差异十分有用。Medina^[37]提出了两段模式,将浅水部分从破波部分独立出来,并且考虑了海滩的波浪反射和海平面的潮汐变化。Bernabeu^[38]等又在两段模式的基础上提出了一个可以在不同破浪和潮汐的情况下预测海滩剖面的形态模式,并利用此分段模型对西班牙 9 个海滩进行拟合,拟合结果良好,此模式将海滩剖面与水动力参数和沉积学参数联系了起来,物理意义清晰,应用前景良好。

3 海滩剖面稳定性分析

海滩稳定性是对于海岸工程来说是必须考虑的内容,海滩剖面类型的判定也是海岸工程的重

要部分。由地形动力学定量分析方法得出的判别式一般是由实验数据和现场数据分析建立起波要素、泥沙性质和剖面坡度之间的关系式,海滩剖面有 3 种主要类型:侵蚀型、过渡型和淤积型。在这方面,国内外一些研究人员如 Sunamura 和 Horikawa^[39]、Hattori 和 Kawamoto^[40]、徐啸^[41]等提出的判别式有一定的代表性。这些研究成果促进了人们对海滩剖面与海滩蚀积变化的理解,但判别式中一些参数还难以确定,这在很大程度上影响了其实际应用。

海滩剖面的时空变化是海滩稳定性的重要内容,其充分反映了海滩环境的独特性。一些研究者^[42-44]通过经验正交函数变换分析了海滩剖面变化的主要空间过程及其时间振荡特性。海滩剖面经验特征函数方法客观地描述了海滩剖面地形变化与主要周期,但是大多数研究者在运用经验正交函数分析海滩的地形变化时,只着重考虑海滩原始场的动态变化特征,而忽视了对海滩原始平均场特征的分析,因而其分析结果并不能从根本上反映海滩的变化过程特征^[44-47]。

波浪和潮汐是影响海滩过程的重要动力因子,海滩地貌与其关系密切。岬湾海滩的剖面形态、滩面砂粒大小和演变趋势主要取决于波浪和潮汐的强弱及彼此消长。夏东兴和崔金瑞^[48]引入浪潮作用指数(K),定义 $K = 2.5 H/R$,为判别海滩状态对水动力环境的响应特征提供了定量的指标。蔡锋等^[49]认为全新世海侵海平面相对稳定后,海岸动力条件的塑造对其起着决定性的影响,而浪潮作用指数是其中重要的影响指标。我国华南大多是浪控海滩,先前的研究也多集中在浪控海滩,潮汐对海滩剖面过程的影响往往被波浪和风暴等作用所掩盖,现在的海滩剖面模式中也很少涉及潮汐的影响,因此,加强潮控海滩的研究对全面理解和认识潮汐对海滩剖面过程的影响具有重要意义。

4 海岸泥沙运动

海滩剖面的变化是海岸泥沙搬运的结果。根据泥沙运移的方向,一般可分为沿岸运动和横向搬运。前者平行于海岸,与波浪产生的沿岸流有

关。后者垂直于海岸方向,主要是波浪轨迹运动产生的。

4.1 泥沙的纵向运动——沿岸输沙

对沿岸输沙率(容量)和沿岸实际输沙率(强度)的估算,目前从理论和应用上都存在较大困难。张军等^[50]在薛家岛岬湾型海岸侵蚀的定量性研究中采用了国际较为通用的波浪辐射应力模式方法对薛家岛中部石雀湾一带沿岸输沙率做一数量级水平的估计。陈坚等^[51]在厦门岛东南部海岸泥沙运移中参照了《港口工程技术规范》,沿岸输沙率计算采用:

$$Q=0.0064 \times K \times \delta_0 \times H_b \times C_b \times n_b \times \sin 2\alpha_b \quad (11)$$

式中: Q 为单位时间沿岸泥沙输沙率(m^3/s);

δ_0 为深水波陡;

H_b 为破波波高(m);

C_b 为破波波速(m/s);

α_b 为波浪破碎时波峰线与等深线的夹角($^\circ$);

K 为与 δ_0 、 D 有关的系数;

D 为沙粒中径(mm);

n_b 为与 D_b 、 L_b 有关的系数;

D_b 为碎波时水深(m);

L_b 为碎波时波长(m)。

沿岸输沙率的沿程变化同海岸上许多堆积地貌与侵蚀地貌的发育过程密切相关,是海岸工程环境研究中的一个至关重要的课题。迄今,许多学者仍致力于有关技术方法的开拓或进一步完善之中,王玉海^[52]构建了高强度推移质输沙过程中固—液混合体运动的理论模型,通过寻求模型的特解并推导成一维沿岸输沙率公式。

$$q_b = uCh = \frac{ud\theta}{\tan\varphi\cos\beta - \sin\beta - \frac{\rho_t}{(\rho_s - \rho_t)C}\sin\beta} \quad (12)$$

式中: u 为波浪作用下底部固—液混合体的深度平均运动速度;

C 为深度平均的颗粒体积比浓度;

h 为在恒定流作用下固—液混合体的厚度;

θ 为无量纲希尔兹参数;

d 为颗粒粒径,对于非均匀沙可以用 d_{50} 来代替;

φ 为颗粒的动态内摩擦角;

β 为坡度角;

ρ_s 、 ρ_t 分别为固体、液体的密度。

该公式适宜计算强浪作用下的推移质输沙率,已得到了大型波浪水槽、往复流水道和海滩现场实测输沙率资料的良好验证。

4.2 泥沙的横向运动——向岸—离岸运动

目前,描述向岸—离岸泥沙搬运和海滩变化的模型不是很多,这些模型大多是建立在实验和波浪较小时现场测量资料基础上的,各个输沙率公式的数学表达式类似,但计算结果相差很大。最常用的横向输沙的模型为Dean^[29]提出的海滩剖面模型,它是基于平衡剖面处每单位水体积波能的耗散率是一致的假设上提出的。一般情况下,离岸输沙由底流控制,向岸输沙则由不对称的振荡运动控制。在Larson等^[53]的分析中,只考虑了由底流驱动的离岸搬运,而忽略了由振荡运动驱使的向岸搬运。

波浪和潮流的共同作用是海岸泥沙运动和岸滩演变的主要动力,它们共同作用下的泥沙运动及其模拟一直都是海岸工作者研究的重点。Bijker^[54]首先考虑了波浪和潮流,其提出的Bijker模型对泥沙输移的模拟效果和现今这些复杂的模型差不多,它在海岸工程上得到了广泛应用。Van Rijn^[55]等建立了海岸环境波流作用下泥沙运动数学及试验模型,采用悬沙对流扩散模式计算了时均含沙量的垂向分布。曹祖德等^[56]采用分层二维模式模拟了三维波流作用下的泥沙输运及海底演变。窦国仁等^[57]导出了波浪和潮流共同作用下的悬沙输移方程式和挟沙能力公式,建立了河口海岸平面二维泥沙数学模型。Davis等^[58]提出了一个局部的一维模型——TKE模型,它可以预测内波和平均周期下的泥沙浓度和通量。Baumert等^[59]采用K— ϵ 紊流模式封闭水流运动方程,开发了波流共同作用下的悬移质输移模型,计算了波浪对表面及床底糙率紊动动能通量的影响,并应用于英吉利海峡泥沙模拟。Prandle等^[60]选择Holderness海岸,分析了潮流和波浪的基本特性以及它们之间的相互作用,建立了波流共同作用下的二维悬沙模型。Antunes^[61]等发展了一个考虑波流影响的完整的非黏性泥沙输移和床面变化的计算模型。现在的研

究模型在模拟泥沙运动趋势上是基本正确的,但在净输沙率的计算上还是不能让人们完全信服,在数量上只能维持量级正确,更大的床面粗糙度或许更适合实验室工作。泥沙输移的影响因素有很多,现场测量困难,还有很多基本问题需要解决,泥沙运动的基本理论还有待提高。

对于岬间海岸,在常浪情况下波浪所引起的泥沙横向运动只是把泥沙在近岸区来回搬运,从较长时间看并不引起海岸的侵蚀,但是岬间海岸因为岬角的屏蔽而能对波浪特别是台风引起的高能量波浪有明显的消能作用,已有研究表明,此类海岸的泥沙输运在横向方向上的转换尤为突出^[62],因而对此类海岸的泥沙输运研究,主要是将重点集中在海滩泥沙的横向输运问题上^[62-65]。由于近岸海岸的动力地貌情况复杂多变,泥沙的横向输移亦趋于复杂。目前,关于泥沙输移方面的研究,尽管获得了很大的进展,但在一些方面还不是很成熟,比如泥沙沉降速度、挟沙力等,有很多是经验性的公式,其中假定的成分较多,影响了模型的进一步发展,泥沙模型自身有待提高,对他们的机理和应用性研究仍然是目前的热点。

5 研究展望

岬间海湾平衡形态规律在海岸长期侵蚀演变预测方面有着广泛的应用,但是现今这些平面形态公式建立在拟合基础上的经验公式缺乏机理上的分析,有些只是纯粹的几何关系,所有这些模型都是在其中嵌入特定的数学函数,而海滩平衡形态并非简单的数学函数关系能够描述。人工神经网络模型不象传统模型,它没有基于岸线曲线的给定数学表达式,“智能”的学习能力亦是其一大亮点。它克服了传统模型的缺点,是未来新型模型改进的方向。

海滩剖面形态复杂,不同区域的差异性也很大,单单只用一种模型来描述是很难的,因此,模式分段使用,亦或2种或多种模式配合使用,更加符合实际情况。目前的平衡剖面理论还很不完善,继续开展剖面数据拟合的同时,今后应加强其机理的研究。

也许是相对中小潮差海滩而言大潮差海滩的范围有限,对于浪控海滩的研究较多,但对潮控海

滩的研究则相对较少。加强潮控海滩的研究有利于理解潮汐对海滩剖面过程的影响和沉积物输移的过程。

在波流条件下的泥沙输移预测一直是海岸工作者的一个巨大挑战,现今还未有成熟系统的模型,简单地使用现有的模型很可能得不到理想的结果。今后模型研究的重点应在进一步提高对详细泥沙输移过程的理解上,再先进的模型亦需要现场资料对其验证,以便使用者做出最优的选择。

单一学科的思维分析和单一模型或模式的引用对研究的区域具有很大的局限性,研究的内容设计考虑不全,得出的理论往往不具备普遍性,所以,应该利用时间和空间上不同尺度的各种方法形成泥沙学、流体力学、地质地貌学、波浪动力学交叉学科,利用计算机数值模拟技术的快速发展,对岬湾海滩进行研究,从而在理论上有所突破。

参考文献:

- [1] Silvester R, Hsu J R C. Coastal stabilization: Innovative concepts [M]. Englewood Cliffs; P T R Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [2] Short A D, Masselink G. Embayed and structurally controlled beaches [M]. Short A D. Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. New York: John Wiley & Son, 1999: 230-249.
- [3] Halligan G H. Sand movement on the New South Wales coast [J]. Proc. Limnology Soc. 1906, 31: 619-640.
- [4] Silvester R. Stabilization of sedimentary coastlines [J]. Nature, 1960, 188: 467-469.
- [5] Yasso W E. Plan geometry of headland bay beaches [J]. Geology, 1965, 73: 702-714.
- [6] Silvester R, Ho S K. Use of crenulate shaped bays to stabilize coasts [C]//Proc 13th Inter Conf Coastal Eng, ASCE, 1972: 1 394-1 406.
- [7] Rea C C, Komar P D. Computer simulation models of hooked beach shoreline configuration [J]. Sedimentary Petrology, 1975, 45: 866-872.
- [8] Silvester R, Tsuchiya Y, Shibano T. Zeta bays, pocket beaches and headland control [C]//Proc 17th Inter Conf Coastal Eng, ASCE, 1980: 1 306-1 319.
- [9] Hsu J R C, Uda T, Silvester R. Shoreline protection methods Japanese Experience [M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [10] Hsu J R C, Benedet L, Klien A H F, et al. Appreciation of static bay beach concept for coastal management and protection [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24(1): 198-

- 215.
- [11] 夏益民. 平衡沙质海岸平面曲线形态规律[R]. 南京: 南京水利科学研究院河港研究所, 1988.
- [12] Hsu J R C, Evans C. Parabolic bay shapes and applications [J]. *Proceedings Civil Engrs*, 1989, 87: 557-570.
- [13] Ming D, Chiew Y M. Shoreline changes behind detached breakwater [J]. *Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 2000, 126(2): 63-70.
- [14] González M, Mendina R. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches [J]. *Coastal Engineering*, 2001: 209-225.
- [15] Hsu T W, Jan C D, Wen C C. Modified McCormicks model for equilibrium shorelines behind a detached breakwater [J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30: 1 887-1 897.
- [16] Oliveira F S B F, Barreiro O M. Application of empirical models to bay-shaped beaches in Portugal [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 124-131.
- [17] Moreno L J, Kraus N C. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design [C]//*Proceedings of Coastal Sediments '99*. New York: American Society of Civil Engineers, 1999: 860-875.
- [18] Gonzalez M, Medina R. On the application of static equilibrium bay formations to natural and mall-made beaches[J]. *Coastal Engineering*, 2001, 43(3/4): 209-225.
- [19] Klein A H F, Vargas A, Raabe A L A, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29: 1 249-1 257.
- [20] 杨燕雄, 张甲波. 静态平衡岬湾海岸理论及其在黄、渤海海岸的应用[J]. *海岸工程*, 2007, 26(2): 38-46.
- [21] 李志龙, 陈子燊. 岬间砂质海岸平衡形态模型及其在华南海岸的应用[J]. *台湾海峡*, 2006, 25(1): 123-124.
- [22] 于吉涛, 陈子燊. 华南岬间砂质海岸稳定性研究[J]. *海洋工程*, 2010, 28(2): 111-112.
- [23] Jackson D W T, Cooper J A G. Application of the equilibrium planform concept to natural beaches in Northern Ireland[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 112-123.
- [24] 李志龙, 陈子燊. 岬间海湾岸线平衡形态神经网络模型[J]. *海洋通报*, 2007, 26(3): 19-25.
- [25] Iglesias G, López I, Castro A, et al. Neural network modelling of planform geometry of headland-bay beaches[J]. *Geomorphology*, 2009, 103: 577-587.
- [26] Iglesias G, Diz-lois G, Pinto F T. Artificial Intelligence and headland-bay beaches [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 176-183.
- [27] Schwartz M L. The encyclopedia of beaches and coastal environments [M]. Stroudsburg: Hutchinson Ross, 1982: 940p.
- [28] 印 萍, 吕京福, 夏东兴. 海滩均衡剖面的概念及相关问题的讨论 [J]. *黄渤海海洋*, 2001, 19(2): 39-45.
- [29] Dean R G. Equilibrium beach profiles, characteristics and applications [J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(1): 53-84.
- [30] Bodge K R. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression [J]. *Journal of Coastal Research*, 1992, 8(1): 47-55.
- [31] Lee P Z F. The submarine equilibrium profile: A physical model [J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 1-7.
- [32] Türker U, Kabdas-li M S. The effects of sediment characteristics and wave height on shape-parameter for representing equilibrium beach profiles [J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33: 281-291.
- [33] Bernabeu A M, Medina R, Vidal C. Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile model [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57: 577-585.
- [34] Komar P D, Willian GM. The analysis of exponential beach profiles [J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 59-69.
- [35] Romańczyk W, Boczar-karakiewicz B, Bona J L. Extended equilibrium beach profiles [J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52: 727-744.
- [36] 陈子燊. 波控岬间海岸平衡剖面形态及其地形学意义[J]. *南海研究与开发*, 1999(1): 5-11.
- [37] Medina R, Bernabeu A M, Vidal C, et al. Relationships between beach morphodynamics and equilibrium profiles [C]//*Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 2000: 2 589-2 601.
- [38] Bernabeu A M, Medina R, Vidal C. A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences [J]. *Marine Geology*, 2003, 197: 95-116.
- [39] Sunamura T, Horikawa K. Two-dimensional beach transformation due to waves [J]. *Coastal Engineering*, 1974: 920-938.
- [40] Hattori M, Kawamoto R. Onshore-offshore transport and beach profile change [C]//*Proceedings of 17th Coastal Engineering Conference*. New York: ASCE, 1980: 1 175-1 193.
- [41] 徐 啸. 二维砂质海滩的类型和冲淤判数[J]. *海洋工程*, 1988(6): 51-62.
- [42] 李志龙, 陈子燊, 戴志军. 粤东汕尾岬间海滩体积短期变换分析[J]. *中山大学学报*, 2004, 43(2): 112-116.
- [43] 戴志军, 陈子燊, 欧素英. 粤东汕尾岬间海滩剖面月内日变化过程特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(1): 27-32.
- [44] 陈子燊. 海滩剖面时空变化过程分析[J]. *海洋通报*, 2000, 19(2): 42-48.
- [45] Aubrey D G. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement [J]. *J. G. R.*, 1979, 84: 6 347-6 354.
- [46] Felder W, Hayden B, Dolan R. Analysis of inshore and offshore profiles [J]. *J. Geol.*, 1979, 87: 455-461.
- [47] Aubrey D G, Ross R M. The quantitative description of beach cycles [J]. *Mar. Geol.*, 1985, 69: 155-170.

- [48] 夏东兴,崔金瑞. 山东半岛海岸地貌与波浪、潮汐特征的关系 [J]. 黄渤海海洋,1992,10 (3):20-25.
- [49] 蔡 锋,苏贤泽,曹惠美,等. 华南砂质海滩的动力地貌分析 [J]. 海洋学报,2005,27(2):106-113.
- [50] 张 军,孙晓霞,印 萍,等. 薛家岛岬湾型海岸侵蚀的定量性研究 [J]. 海洋学报,2002,24(3):61-66.
- [51] 陈 坚,蔡 锋. 厦门岛东南部海岸演变与泥沙输移 [J]. 台湾海峡,2001,20(2):135-139.
- [52] 王玉海. 沙质海岸强浪作用下沿岸输沙问题研究 [J]. 海洋工程,2008,26(4):40-44.
- [53] Larson M, Hanson H, Kraus N C, et al. Short and long-term responses of beach fills determined by EOF analysis [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1999, 125(6):285-293.
- [54] Bijker E W. Longshore transport computations [J]. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, 1971:687-701.
- [55] Van R J, Kroon A. Sediment transport by currents and waves [C]//Proceedings of the Coastal Engineering Conference, Oct 4-9 1992, ASCE, 1993; 2 613-2 628.
- [56] 曹祖德,王运洪. 水动力泥沙数值模拟 [M]. 天津:天津大学出版社,1994.
- [57] 窦国仁,董凤舞,窦希萍,等. 河口海岸泥沙数学模型研究 [J]. 中国科学(A 辑),1995,25(9):995-1 001.
- [58] Davies A G, Li Z. Modelling sediment transport beneath regular symmetrical and asymmetrical waves above a plane bed [J]. Continental Shelf Research, 1997, 17 (5):555-582.
- [59] Baumert H, chapalain G, Smaoui H, et al. Modelling and numerical simulation of turbulence, waves and suspended sediments for pre-operational use in coastal seas [J]. Coastal Engineering, 2000, 41:63-93.
- [60] Prandle D, Hargreaves J C, McManus J P, et al. Tide, wave and suspended sediment modelling on an open coast-Holderness [J]. Coastal Engineering, 2000, 41:237-267.
- [61] Antunes D C J S, Seabra-santos F J. Near-shore sediment dynamics computation under the combined effects of waves and currents [J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33(1):37-48.
- [62] Clarke D J, Eliot I G. Low-frequency changes of sediment volume on the beachface at Warilla beach, New South Wales, 1975—1985 [J]. Marine Geology, 1988, 79:189-211.
- [63] Dean R G. Introduction to coastal processes [M]. Cambridge: United Kingdom at the University Press, 2003: 210-266.
- [64] 杨干然,李春初,罗章仁,等. 海岸动力地貌学研究及其在华南港口建设中的应用 [M]. 广州:中山大学出版社, 1995:1-313.
- [65] 罗章仁,田向平,罗宪林,等. 华南港湾 [M]. 广州:中山大学出版社,1992:1-39.

PROGRESS IN SEDIMENT DYNAMIC GEOMORPHOLOGICAL STUDY OF HEADLAND-BAY BEACHES

TONG Xiaoling, SHI Lianqiang, XIA Xiaoming, CHENG Lin

(State Research Centre for Island Development and Management,
The Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The study of headland-bay beaches is significant to the stability of sandy coasts. After a review of some models concerning beach equilibrium, types of beach profile and coastal sediment movement, the authors realized that the artificial neural network model represents the new direction for improvement of existing models. Our experience demonstrates that it is more efficient if we divide the beach into sections and use beach equilibrium profile model for each sections or use two or more models for one beach profile. In former researches, the influence of tide on beach is always ignored. So it is required to enhance the study of tide-dominated beaches. In addition, there is lack of formulas for the sediment transportation, and the formulas now in use have too many assumptions. Therefore, it requires further research in this subject. In conclusion, the multi-disciplinary integration is the key to the headland-bay beaches research.

Key words: headland-bay beaches; planform shape; equilibrium profile; coastal sediment movement