

海滩体积时空变化和波浪场的奇异谱分析

戴志军¹, 路海亭¹, 欧素英², 李春初², 陈建勇¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 中山大学 河口海岸研究所, 广东 广州 510275)

摘要: 海滩响应波浪动力作用的变化是海岸带陆海相互作用研究的重要内容。利用奇异谱分解方法对南湾海滩连续实测剖面的体积变化值与南湾逐日波高变化值的相关关系进行了探讨, 以诊断分析波浪在海滩变化过程中的内在作用机制, 结果表明: (1) 海滩体积的时空变化与波浪作用力有明显的相关关系; (2) 海滩响应波浪动力作用变化最明显的地方是在中间岸段, 在直线岸段次之, 在遮蔽岸段最弱; (3) 对海滩变化有较强作用的波浪场分别位于近岸及其与上下岬角连线的邻近区域。

关键词: 海滩; 波浪动力; 奇异谱分析

中图分类号: P731.22;

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2008)03-0133-07

1 引言

海滩响应波浪动力的变化过程是一种极其复杂的现象^[1-3]。由于波浪动力的随机性及其海滩时空变化的复杂性, 在海岸研究领域一直很难获得比较简单的、有判断性质的公式或模式来描述波浪与海滩之间的关系, 对海滩体积变化与波浪动力作用的耦合机制缺乏较深入的理解^[2]。基于此, 本文将利用珠海南湾海滩的连续实测剖面资料和波浪数据, 运用奇异谱分解技术提取海滩体积变化和南湾海区波浪场的优势信号, 以诊断分析波浪与海滩相互作用的复杂机理, 揭示波浪在岸滩过程中的内在作用。

2 研究区域概况

南湾海滩位于珠海荷包岛南部的南湾弧形海湾内(图1), 湾口宽约4 km, 最大凹入长度约为1.4 km, 海滩长约5 km。自后滨沙丘前缘到平均高潮线, 海滩平均宽约100 m。在海滩高中潮位附近表层由细砂组成, 平均中值粒径分别为0.19和0.22 mm, 分选系数为0.37和0.44; 在低潮位附近表层由中砂组成, 平均中值粒径为0.27 mm, 分选

系数为0.53。结合荷包岛1981到1982年和大万山2001到2002年的实测波浪资料, 海区波候特征以涌浪为主的混合浪频率最大, 常浪向为南东, 其次为南、东, 年平均波高为0.56 m, 平均周期为5.1 s。夏半年以偏南向浪为主, 冬半年以东南向浪为主。海区潮汐为不正规半日混合潮, 平均潮差小于1 m。该段海岸属于波控弱潮海岸^[4]。

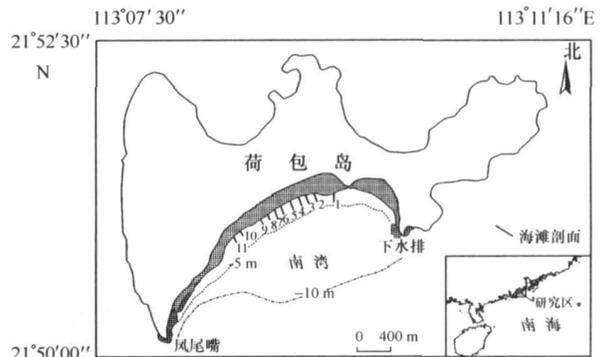


图1 荷包岛南湾海岸

3 研究方法和资料收集

3.1 资料收集

在研究地点南湾海滩自东向西设置与当地海平

收稿日期: 2007-07-31; 修订日期: 2007-11-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40506021; 40771200); 上海市科技启明星资助项目(06QA14016)。

作者简介: 戴志军(1973-), 男, 湖南省隆回县人, 副教授, 博士, 从事河口海岸动力地貌和动力沉积、海岸管理和资源规划。E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

面连测的固定桩点 11 个(见图 1),自 2001 年 7 月 4 日到 8 月 6 日,利用水准仪和 5 m 的标尺逐日沿桩点对剖面进行重复测量,共获取为期 34 d 的海滩剖面变化资料(图 2)。对每条剖面高程进行水平间隔为 3 m 的样条插值,同时计算每个点位单宽为 1 m 的海滩体积,共得到海滩上 493 个点的单宽体积变化数据,构成 493×34 的矩阵,该矩阵可表征海滩体积变化场的时空变化。将南湾海区(大致为海图上 $-1 \sim -11$ m 的海区)按纵向为 25 m,横向为 50 m 的间隔划分成网格,共 1 617 个格点(图 3),利用波浪折射-绕射模型计算每天每个格点的波高值,构成 $1 617 \times 34$ 的矩阵,该矩阵表征这个海区波高场的时空变化。在观测期间这个海区先后经历了两次台风(2001 年 7 月 4-5 日的 200104 号台风和 7 月 22-27 日的 200107 号台风),该海区出现了较大的波浪增水现象^[5](图 4)。

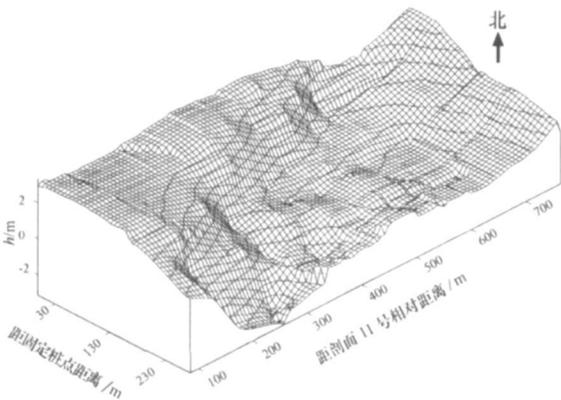


图 2 实测海滩高程变化(2001 年 7 月 4 日所测)

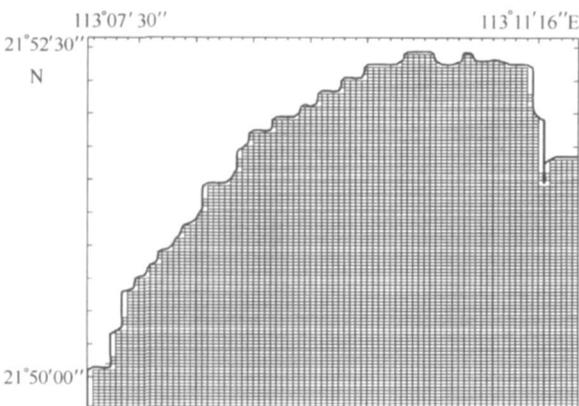


图 3 研究海区的波高计算网格

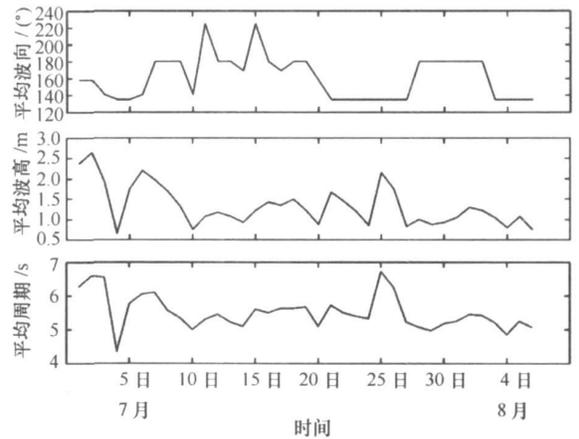


图 4 监测期间的波浪变化图

3 2 研究方法

3 2 1 南湾海区的波高变化计算

由于波浪动力的随机性和复杂性,本文并不考虑海滩对波浪的瞬时响应,而只研究海滩地形的日变化与海区日平均波浪变化的耦合作用,故在此仅计算日平均状态下的单频波在受到地形影响后的波高在海湾中的分布。每个格点的逐日平均波高由正常的波浪绕射-折射模型给出。

在计算破波带外海区的波高时,沿用 Ebersole^[6]给出的考虑折射-绕射联合效应的复杂地形上坡度缓变的单频波传播模型:

$$\omega^2 = gk \tanh kh, \quad (1)$$

$$|\Delta l|^2 = k^2 + \frac{1}{H} \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{1}{CC_g} \times \left(\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial CC_g}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial CC_g}{\partial y} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (|\Delta l| \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial y} (|\Delta l| \cos \theta) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (H^2 CC_g |\Delta l| \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (H^2 CC_g |\Delta l| \sin \theta) = 0, \quad (4)$$

式中, $H(x, y)$ 为局地波高; $\theta(x, y)$ 为局地波向; $k(x, y)$ 为波数, $C(x, y)$ 为波速, $C_g(x, y)$ 为群速; $s(x, y)$ 为位相函数。

由于 Ebersole 的模型在波浪进入破波带后不成立,因而在假定破波带内的波动仍为单频线性波的条件下 Ebersole 模型可推广到破波带内,此时破波带内的模型方程为^[7]

$$H = rh, r \text{ 为常数, } r = 0.6 \sim 1.0, \quad (5)$$

$$|\Delta l|^2 = k^2 + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{1}{CC_g} \times \right.$$

$$\left[\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial CC_g}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial CC_g}{\partial y} \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(l \Delta s \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial y}(l \Delta s \cos \theta) = 0, \quad (7)$$

$$\omega^2 = gk \operatorname{th}(kh), \quad (8)$$

式中, ω 为角速度; g 为重力加速度; $h(x, y)$ 为静水深度。

在研究海区没有波浪观测站, 但考虑到距离荷包岛南湾海滩东南方向近 40 km 的大万山的波浪观测站所处的近海等深线与南湾基本一致, 采用 2001 年 7 月 4 日至 8 月 6 日的大万山海洋站每日目测 4 次的波高、波向及其周期的平均值^①作为波浪绕射-折射模型的开边界输入数据(见图 4)。

3.2.2 南湾海滩体积变化场和海区波高变化场的奇异谱分解

从两个(或以上)场提取两种耦合优势信号特征的统计技术主要有典型分析(CCA)、神经网络(BP)方法、BP 典型相关分析及其奇异谱分解(SVD)等, 其中 SVD 有坚实的数学基础, 计算较其他方法简单, 而且物理解释意义明确, 被认为是一种具有广阔应用前景的分析方法^[8]。Prohaska^[9]最先将这种方法用于诊断美国月平均地表气温与北太平洋海面气压之间的关系。Bretherton et al.^[10]从矩阵理论中的奇异值分解定理出发, 较系统地描述了这种方法的原理和计算。本文将 SVD 首次引入到海岸领域, 以分析海滩体积变化场与波高变化场的相互作用机制。

(1) 对海滩体积变化场和波浪变化场的两列时间序列矩阵分别作标准化处理, 以消除数据量纲的影响, 从而获得海滩体积变化场(左场)的时间序列为 $X(t) = [Y_1(t), \dots, x_p(t)]$ 、波浪变化场(右场)的时间序列为 $Y(t) = [Y_1(t), \dots, Y_q(t)]$, $t = 1, \dots, n$, 其中 t 为进行观测的海滩变化时间; n 为观测的天数, $n = 34$ d; p 和 q 分别为海滩体积变化和波浪变化的空间网格点, $p = 493$, $q = 1617$ 。

(2) 计算两变量场的交叉协方差矩阵 S :

$$S_{pq} = XY^T. \quad (9)$$

(3) 将交叉协方差矩阵作 SVD 分解得到奇异值和左、右奇异向量, 在此基础上分别计算两场的时间系数 T, Z , 具体计算步骤为:

对交叉协方差矩阵作 SVD 分解得到

$$S = \sum_{k=1}^r \lambda_k \bar{U}_k \bar{V}_k \quad r \leq \min(p_1, p_2), \quad (10)$$

式中, $\lambda_k = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$, 对应的奇异值为 $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r)$; $\bar{U}_k = (u_1, u_2, \dots, u_r)$, 是 p 维的 r 个正交的列向量, 称为左奇异向量; $\bar{V}_k = (v_1, v_2, \dots, v_r)$, 是 q 维的 r 个正交的列向量, 称为右奇异向量; 将海滩体积变化场和波浪变化场按各自的奇异向量完全展开为

$$X_{p \times n} = \bar{U}_{p \times r} T_{r \times n}, \quad (11)$$

$$Y_{q \times n} = \bar{V}_{q \times r} Z_{r \times n}, \quad (12)$$

其中 T, Z 即为 r 个行向量正交的时间系数矩阵, 它们分别与 \bar{U}, \bar{V} 对应, 而由式(10)变换可得

$$T_{r \times n} Z_{r \times n}^T = \lambda \times r. \quad (13)$$

式(13)表明奇异值为海滩体积变化场和波浪动力变化场按各自奇异向量展开的时间系数的内积; 式(11)、(12)说明利用 SVD 分解海滩体积变化场和波浪变化场的交叉协方差矩阵所得到的左、右奇异向量实际上是将海滩体积变化场和波浪变化场重新表示为由奇异向量和时间变化的线性组合, 因此每一个奇异值及相应的每一对左、右奇异向量和时间系数确定一对 SVD 模态, 其中每一对左、右奇异向量表征了在观测时间内的波浪动力作用以及与此相关的风滩体积变化, 两场各自的时间系数则反映了波浪动力和海滩体积随时间变化的相应幅度或强度。

(4) 进一步计算海滩体积变化场与波浪变化场之间的相关系数与奇异性相关系数。

1) 两个变量场的相关系数为

$$r_i(T, Z) = \frac{\lambda_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^n T_{ik}^2 \sum_{k=1}^n Z_{jk}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (14)$$

2) 奇异性相关系数:

海滩体积变化场与相应右奇异向量的时间系数 Z 之间的相关系数为

$$r_i(X, Z) = \frac{\lambda U_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^n Z_{ik}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, r; \quad (15)$$

波浪动力变化场与相应左奇异向量的时间系数 T 之间的相关系数为

$$r_i(Y, Z) = \frac{\lambda V_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^n T_{ik}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (16)$$

相关系数的大小客观反映了海滩体积变化与波

①资料来源于国家海洋局南海分局海洋信息中心。

浪变化两个变量场之间的总体相关程度, 而奇异性相关系数 $r_i(X, Z)$ 表征了随时间变化的波浪动力作用与海滩体积变化场的相关分布状态, 其中海滩体积变化场中 $r_i(X, Z)$ 的大小反映了海滩不同的空间点受波浪作用或影响的程度; 奇异性相关系数 $r_i(X, Z)$ 的大小反映了海域不同空间点上波浪动力对海滩体积变化的影响程度。

(5) 计算每对奇异向量的方差贡献和累计方差贡献:

设奇异值 λ 是按从大到小排序的, 即 $\lambda \geq \lambda \dots \geq \lambda$, 每对奇异向量的方差贡献为

$$G_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^k \lambda_i, \quad (17)$$

前 k 对奇异向量累计方差贡献为

$$G_c = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^r \lambda_i. \quad (18)$$

(6) 用 Monte-Carlo 技术对奇异向量作显著性检验。从统计意义上讲用 SVD 方法时要求样本量大于变量场的空间点数, 否则可能会产生虚假相关, 考虑到海滩体积变化场和波浪动力变化场的空间点数大于实际测量的天数(样本量), 进一步采用 Monte-Carlo 技术检验 SVD 分解后每一对奇异向量的显著性, 即通过检验的每一对奇异向量能表征海滩体积变化和波浪作用变化的耦合关系。计算步骤为^[11]: 对奇异值 $\lambda, \lambda \geq \lambda \dots \geq \lambda$, 每对奇异向量的方差贡献为

$$G_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^r \lambda_i. \quad (19)$$

利用随机数发生器产生高斯分布的两个随机序列资料矩阵, 设左变量场海滩体积变化的空间点为 p 个, 右变量场波浪变化的空间点为 q 个, 样本长度 n 为 34, 对上述资料按 SVD 进行模拟计算, 将该过程重复 100 次, 每次模拟都计算方差贡献:

$$U_k^i = \delta_k^i / \sum_{j=1}^r \delta_j^k, \quad k = 1, 2, \dots, r, \\ i = 1, 2, \dots, 100. \quad (20)$$

将 U_k^i 排序, 即 $U_k^1 \leq U_k^2 \leq U_k^3 \leq U_k^{100}, k=1, 2, \dots, r$ 。如果 G_k 大于 U_k^{95} 就认为第 k 对奇异向量在 95% 置信水平下统计显著, 有分析价值。

(7) 相关系数 r 的 t -分布检验。对这个量是否显著需作统计检验, 在此利用 t -检验法来检验它, 即

在原假设 $H_0: \rho = 0$ 条件下统计量^[12]

$$t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (21)$$

遵从自由度为 $n-2$ 的 t -分布, 从而可将计算的相关系数 r 带入式(21), 并与 t -分布检验表中不同显著水平 α 的临界值 t_α 进行比较, 如果 $t \geq t_\alpha$, 则表示相关系数通过 t_α 的检验。

4 结果和讨论

利用定常波浪绕射-折射模型计算大万山波浪观测站的平均波高值, 并将模拟的波高值与实测的平均波高值作相关分析(图 5), 相关系数(r) 达 0.98, 说明利用波浪绕射-折射模型计算该海域所得各网格点的波高是有效的。同时进一步将监测的海滩时间序列和通过波浪绕射-折射模型计算的波高时间序列分别输入用 Fortran 语言编译的 SVD 计算程序, 结果表明两场的模态贡献只有第一对特征值的模态贡献百分含量通过 Monte-Carlo 模拟技术检验(见表 1), 故将第一模态表征的海滩体积变化场与波浪场的奇异性相关系数和相应的时间系数绘制成图 6 和 7(注: 为便于分析, 将海滩体积变化场的计算结果放大, 则图 6 中第一模态空间分布型中 a 图的空间分布位置为南湾实际测量的海滩区域, 波浪场中的空间分布位置(见图 6) 为南湾海区, 以下皆同)。

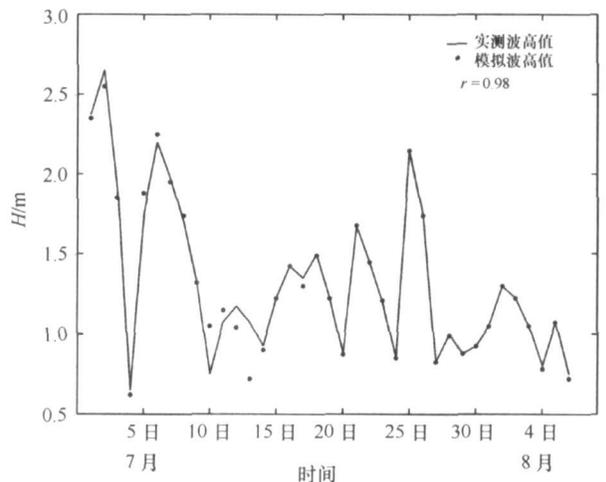


图 5 波浪绕射-折射模型计算的模拟值与实测值比较

图 6 为海滩体积变化场和波浪场的第一对奇异向量分布型, 从左奇异向量分布型(见图 6a) 看出, 正值位于海滩的中间开敞地段, 即第 2 条剖面到第 9 条剖面的冲流带上部以及滩肩发育的部位。负值

表1 南湾海滩场与波浪场的SVD分析中前5个模态二次方协方差贡献百分率及其模态相关系数

模态(k)	模态贡献百分率(%) ($G_k \times 100\%$)	累计百分贡献率 (%)	Monte-Carlo 模拟的 模态贡献百分率(%) ($U_k^{95} \times 100\%$)	模态相关系数
1	77.87	77.87	70.12	0.47
2	14.07	91.94	16.04	0.42
3	5.07	97.01	7.35	0.47
4	1.42	98.43	3.25	0.33
5	0.87	99.30	2.38	0.48

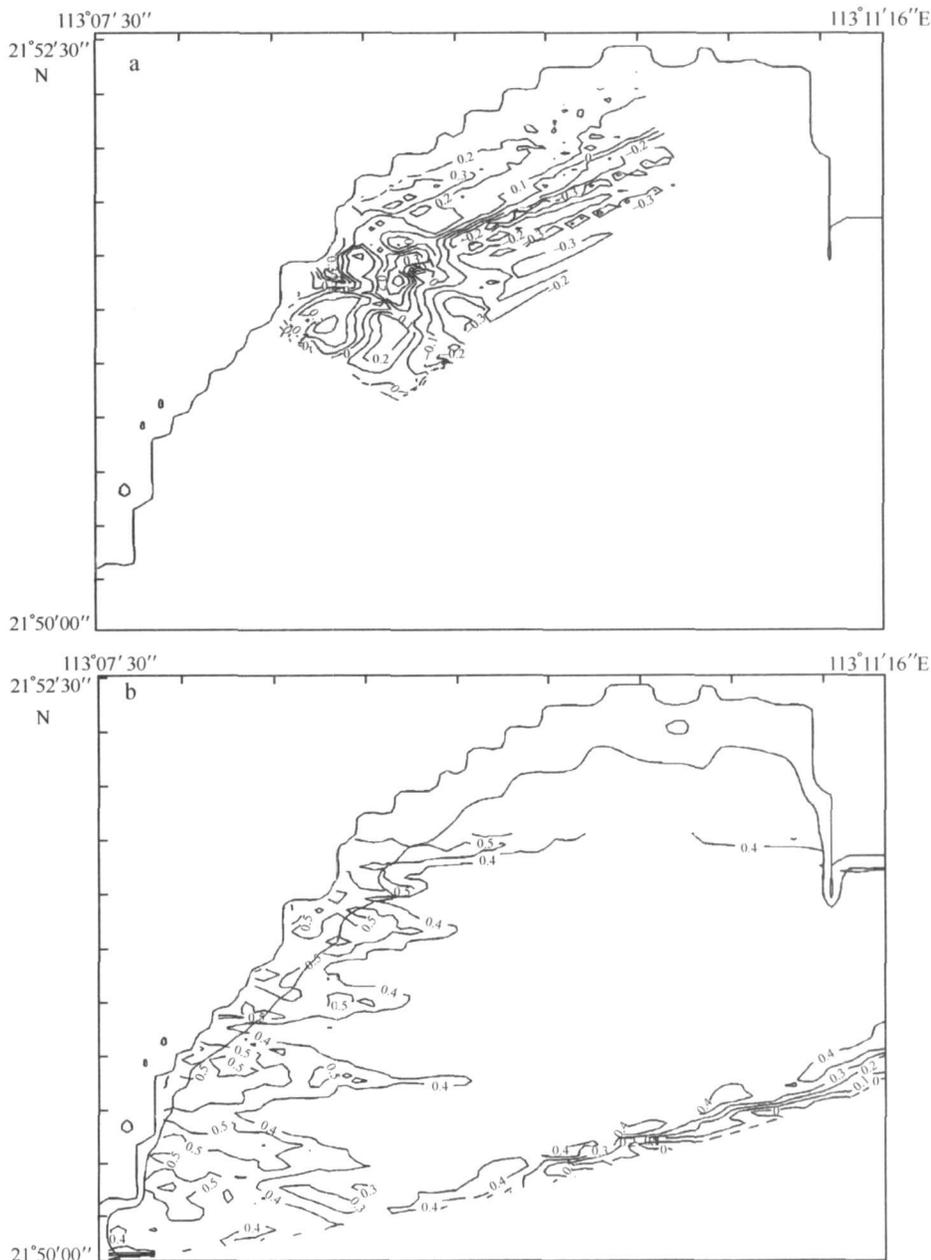


图6 南湾海滩体积变化场(a)与波浪场(b)第一模态空间分布型

位于海滩的低潮带区, 最大负值区在第6和7条剖面的低潮带范围, 中心最大相关系数为-0.36。另一个最大负值区出现在直线岸段第10和11条剖面

的低潮带区, 中心最大相关系数为-0.36, 其相关中心通过0.05信度的 t -分布检验($t = 2.183$, $t_{0.05} = 2.0369$, $t > t_{0.05}$), 湾顶遮蔽岸段海滩部位的相关系

数较小, 不能通过 t -分布检验。从与之对应的右奇异向量(图 6a) 看出, 波浪场的正值区有两个分布带, 一个在沿直线岸段到中间开敞岸段, 大致在 1~7 m 的近岸环境, 另一个带分布在与沿海湾两个岬角(下水排与凤尾嘴) 连线平行的外围, 大致为 9~11 m 水深, 前者最大正值区沿 3 m 等深线分布, 中心最大相关系数为 0.58 ($t = 4.0276$, $t_{0.05} = 2.0369$, $t > t_{0.05}$), 后者最大正值区沿 10 m 等深线分布, 有多个中心, 中心最大相关系数一般为 0.4 ($t = 2.4689$, $t_{0.05} = 2.0369$, $t > t_{0.05}$), 相关中心均通过 0.05 信度的 t -分布检验, 负值区域分布较小, 主要位于靠南湾上岬角处的小块区, 不能通过 t -分布检验。由此可见对海滩起作用波浪动力关键区和海滩响应的区域主要在近岸, 其次在上下岬角连线的邻近部位。

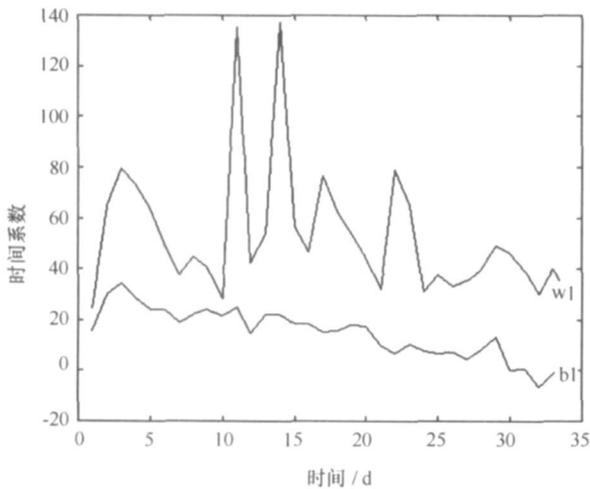


图 7 海滩场与波浪场第一模态对应的时间系数结构
w1 为波浪场对应的时间变化系数, b1 为海滩体积场对应的时间变化系数

实测海滩地貌变化资料表明, 滩肩在观测期间趋于加积状态, 在低潮带部位坡度变陡, 海滩体积减小, 可见低潮带的泥沙在波浪破碎形成的上冲流作用下沿滩面向上搬运, 使该部位体积减小, 而在滩肩区域加积, 即在正相关区海滩淤积体积增加, 在负相关区海滩侵蚀体积减少, 同时海滩的中间岸段属于开敞岸段, 受波浪作用的影响最强, 直线岸段虽受波浪作用的直接冲击, 但该岸段滩肩发育高大, 对波浪的直接冲击具有一定的缓冲作用, 故海滩响应波浪作用的过程次之, 湾顶受岬角下水排的遮蔽, 海滩响应波浪作用的变化最弱, 因而表征海滩体积变化场的第 1 模态空间分布相关系数在中间岸段最大, 而在遮蔽段最小, 此外波浪场的两个正值区域分布中一个紧邻岸边, 另一个分布在

深水区, 这表明海滩体积的变化既受深水入射波的影响, 又受经历折射与绕射后的波浪影响, 其中波浪场的近岸正值区主要是偏西南浪长驱直入后受水下地形的影响与海滩体积场的耦合作用而形成的, 离岸分布的波浪场可能是在台风作用后偏东南向浪与海滩作用而形成的结果。

两场第 1 模态对应的时间系数结构表明(见图 7), 在第 0 天到 10 天、第 25 天到 35 天的两时段内响应有较显著相关, 但在第 10 天至 25 天没有显著相关, 这很可能是由于在监测初期的 7 月 5 日以及 25 日前后的台风作用下(见图 4) 海滩发生快速侵蚀, 随后出现迅速的淤涨状态, 从而表现为在两个阶段海滩对波浪动力作用的响应极为敏感。在第 10 天至 25 天观测波高基本没有大的波动, 而海滩亦处于缓慢的淤积状态, 故在第 10 天至第 25 天海滩时间系数似乎与波浪变化的时间系数没有明显的相关。海滩体积变化场的时间系数为正值, 即海滩的体积处于增加状态, 观测期间的海滩平均坡度变缓, 水下沙坝并陆以及滩肩加积亦证明了这一现象。海滩体积场的振荡幅度虽较波浪场对应的时间系数振荡小, 但振荡的步调与波浪场的摆动一致, 可见两者具有较强的相关性(相关系数为 0.47, $t = 3.0121$, $t_{0.05} = 2.0369$, $t > t_{0.05}$, 通过 0.05 的 t -分布检验)。如果海滩与波浪的监测时间序列较长, 可将经 SVD 分解后的前几个模态所对应的波浪时间系数用来预测海滩的变化, 这为以后的海岸管理与海滩侵蚀预报提供了一条新的预测途径。

5 结论

动力作用通过海岸海滩过程控制物、能及其信息流的输入和输出, 进而影响整个海岸过程的演变及发展。华南弱潮海岸环境的波浪动力对海滩时空变化过程的影响最为显著。基于实测的海滩高程变化和波浪资料, 本文着重分析了荷包岛南湾弧形海滩近岸波浪动力与海滩的相互耦合作用。

(1) 通过 SVD 分解来描述海滩场与波浪场的关系具有较强的一致性。如果两组数据的时间序列较长, 利用 SVD 分解后的波浪场时间系数来预测三维海滩的变化应该是可行的。

(2) 在监测期间海滩近岸泥沙向陆搬运, 在弧形海岸海滩冲流带以上部位普遍发生堆积, 堆积的速度在中间岸段最快、最明显, 在直线段次之, 在湾顶遮蔽段最慢。

(3) SVD 分析的结果表明在监测期间波浪有优势浪、次优势浪及台风大浪等, 因此与海岸海滩变化有关的波浪变化相关区分布在近岸和深水区。这一成果是对华南海岸的研究取得的, 由于只有一个海湾的实际资料, 是否适用于其他海湾, 需要对此作进

一步验证, 但能在较大程度上说明海湾内不同区域的波浪对海滩的作用强弱有差异, 海滩不同部位对波浪的响应敏感程度亦不同, 这可为研究实际的海滩变化与波浪动力的耦合作用提供参考。

参考文献:

- [1] De VRIEND H J. Mathematical modeling and large-scale coastal behavior: Part 1. Physical processes [J]. *Journal of Hydraulics Research*, 1991, 29(6): 727—740.
- [2] LARSON M, CAPOBIANCO M, HANSON H. Relationship between beach profiles and waves at duck, north Carolina, determined by canonical correlation analysis [J]. *Marine Geology*, 2000, 163: 275—288.
- [3] LARSON M, KRAUS N C. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales [J]. *Marine Geology*, 1995, 126: 111—127.
- [4] 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.
- [5] DAI Zhi-Jun, DU Jin-zhou, LI Chun-chu, et al. The configuration of equilibrium beach profile in South China [J]. *Geomorphology*, 2007, 86: 441—454.
- [6] EBERSOLE B A. Refraction-diffraction model for linear water waves [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1985, 111(6): 539—553.
- [7] 李孟国, 张大错. 浪致近岸水位变化及流场的数值计算[J]. *海洋学报*, 1996, 18(4): 96—113.
- [8] 魏凤英, 曹鸿兴. 奇异值分解及其在北美陆地气温与我国降水遥相关中的应用[J]. *高原气象*, 1997, 16(2): 174—182.
- [9] PROHASKA J T. A technique analyzing the linear relationship between two meteorological fields [J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 104: 1345—1453.
- [10] BRETHERTON C S, SMITH C, WALLACE J M. An inter-comparison of methods for finding coupled patterns in climate data [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5: 541—562.
- [11] 解明恩, 张万诚. 云南短期气候预测方法与模型 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 92—98.
- [12] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 28—30.

A singular spectrum analysis between the spatial and temporal changes of beach volumes and wave fields

DAI Zhi-jun¹, LU Hai-ting¹, OU Su-ying², LI Chun-chu², CHEN Jian-yong¹

(1 *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*
2 *Institute of Estuarine and Coastal Research, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: It is an important part of the studies of the coastal land-ocean interaction for the changes of the beach in response to the wave dynamic action. The relationship between the volumes of continuously measured profiles in Nanwan beach and the variable wave heights of Nanwan nearshore region was discussed by using a singular spectrum analysis method, with which singular vector space distribution pattern was obtained. The results were shown as follows: (1) There was close relationship between the changes of beach volumes and wave dynamic action; (2) the sensitivity of response of the middle segment of the beach was obvious to the wave dynamic action; the sensitivity in the straight-line segment was the next in order; the sensitivity in the shadow zone was the weakest; (3) the related area between the wave field of the nearshore region and the beach field was obvious, which was a key area primarily located in the middle segment of the beach, nearshore zone and the adjacent area of the line between the capes stretched out into the sea.

Key words: beach; wave field; singular spectrum analysis