

波浪作用下岬湾海滩蚀积特点: 以澳大利亚 Narrabeen 海滩为例

周赢涛¹, 冯曦^{1,2*}, 管卫兵², 冯卫兵³

1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 南京 210098;
2. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098

* 联系人, E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

2018-04-18 收稿, 2018-08-18 修回, 2018-10-10 接受, 2018-12-28 网络版发表

国家自然科学基金(51709091)、江苏省自然科学基金(BK20170874)、江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室基金(JSCE506)、卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放课题基金(SOED1609)、中央高校基金(2017B00514)和中央高校基本科研业务费专项(2018B647X14)资助

摘要 岬湾海岸因其特殊的岬角弧形地形, 导致海岸线的冲淤与顺直海岸有明显区别. 本文分析了1997~1998年澳大利亚东南部Narrabeen岬湾海滩实测数据. 以1次典型的大浪过程为例, 详细分析了大浪对海滩的侵蚀及其后的常浪修复期海滩岸线的演变情况, 以及岬湾海滩蚀淤沿岸差异与波浪要素之间的关系. 为讨论海滩岸线旋转的非偶然性及其原因, 还分析了1990~2000年6次大浪事件前后的海滩旋转情况, 这6次大浪事件后均有8个月以上的常浪期. 研究表明: 大浪期间海滩普遍侵蚀, 常浪期间沿岸蚀积的差异性导致海滩旋转; 在常浪恢复期间北部至中部剖面南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)负相关, 南部剖面与SOI指数正相关, 导致北蚀南淤, 从而岸线会发生旋转; 伴随着SOI指数的增减, 南北冲淤特性随之发生改变, 海滩岸线旋转呈现周期性.

关键词 岬湾海滩, 波浪, 蚀积, 沿岸差异, 海滩旋转, 南方涛动指数

岬湾海岸是一种复杂的山地海岸地貌类型, 海岸带主要由岬角及海湾组成, 其中岬角的海蚀作用强烈. 岬间沙质海岸以岬角突出海中, 海滩岸线呈月牙形曲线凹入湾头为基本特征. 近岬角水域呈半圆形, 由于受到岬头的影响, 盛行波浪在此发生绕射, 此段海湾为波影区, 又称遮蔽段; 远离岬角的海滩波浪近乎垂直入射, 岸线渐趋平直, 称为切线段^[1]. 岬湾海岸的动力地貌特点与平直岸线的海岸有较大区别, 其中1项主要的区别在于海岸各岸段蚀淤过程的差异较大. 李志龙^[1]指出岬湾海滩波能沿岸分布特征远较顺直海岸复杂; 冯曦^[2]、袁金金等人^[3]分别分析了复杂地形条件下的波浪和潮流特征, Feng等人^[4]在

研究岬湾型地形对风暴潮与潮波交互作用的影响时指出岬湾型地形强化了潮波的与地形的共振现象, 同时也间接辅助了沿岸流对潮波运动的干涉. 海滩的近岸泥沙运动是一项十分复杂的研究课题, Zheng^[5], Zhang等人^[6]分别总结出了经验和数值模拟方法, 较好地解释了水下沙坝和近岸坡度的演变过程. 冯哲^[7]、Spinter等人^[8]则分别通过实地观测和数值模拟揭示了岬湾海滩蚀淤存在沿岸差异性; Short^[9], Ranasinghe等人^[10]发现SOI指数与岬湾海滩岸线蚀淤之间存在关系; Lee^[11], Fritz^[12], Fiore等人^[13]通过测量风暴前后海滩剖面的形态, 研究了大浪对于海滩剖面的侵蚀和修复作用, 但关于岬湾海岸对于大浪响

引用格式: 周赢涛, 冯曦, 管卫兵, 等. 波浪作用下岬湾海滩蚀积特点: 以澳大利亚 Narrabeen 海滩为例. 科学通报, 2019, 64: 223–233

Zhou Y T, Feng X, Guan W B, et al. Characteristics of beach erosion in headland bays due to wave action: Taking the Narrabeen beach in Australia as an example (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 223–233, doi: 10.1360/N972018-00376

应的沿岸差异性研究尚不多见. 目前国内外针对沙质海岸的研究多集中在开敞顺直海岸^[14-16], 对于岬湾沙质海岸蚀淤沿岸差异性的研究十分有限^[17], 因此开展关于大浪对岬湾海岸蚀淤作用的研究可以更好地理解海滩动力地貌的演变过程. 澳大利亚新南威尔士州Narrabeen海滩是典型的岬湾沙质海滩, 本文基于该海滩的波浪和岸线资料, 研究了有资料以来近岸波高最大的波浪对于海滩的强烈侵蚀情况及大浪后期海滩的二维动态变化过程, 分析了波浪要素、岸线形态、滨面泥沙量等与海岸演变直接相关的物理量变化情况, 并探讨了海岸蚀淤与南方涛动指数SOI的关系.

1 背景介绍

Narrabeen海滩位于悉尼北部20 km处, 岸线长约3.6 km, 潮间带和近岸的坡度分别为0.12和0.02. 该

海滩是典型的岬湾型沙质海滩, 主要分布着中值粒径为0.3 mm的细中石英砂(见图1). Narrabeen沙滩是波浪作用为主的沙滩, 潮流影响较小^[18], 深水波能为中高波能分布, 年均有效波高(H_s)约为1.6 m, 谱峰周期(T_p)约为10 s. 长期主导该区域的涌浪为SSE向, 有时也会受NE向和E向热带气旋浪的影响^[19]. 南北岬头的位置和岬湾的曲率使海滩北部受到东南向涌浪的影响较海滩其他区域更大, 近岸波能梯度分布自北向南递减. 海滩北部地形横向属沙坝耗散型, 纵向呈现单沙坝韵律型, 滩肩平均宽度约为80 m, 高于平均海平面9 m; 往南则随着近岸波能的减小, 海滩剖面类型转变为反射型, 滩肩平均宽度约为60 m, 高于平均海平面3~4 m^[20].

2 数据资料

本文数据源于悉尼水研究实验室(UNSW)(<http://>

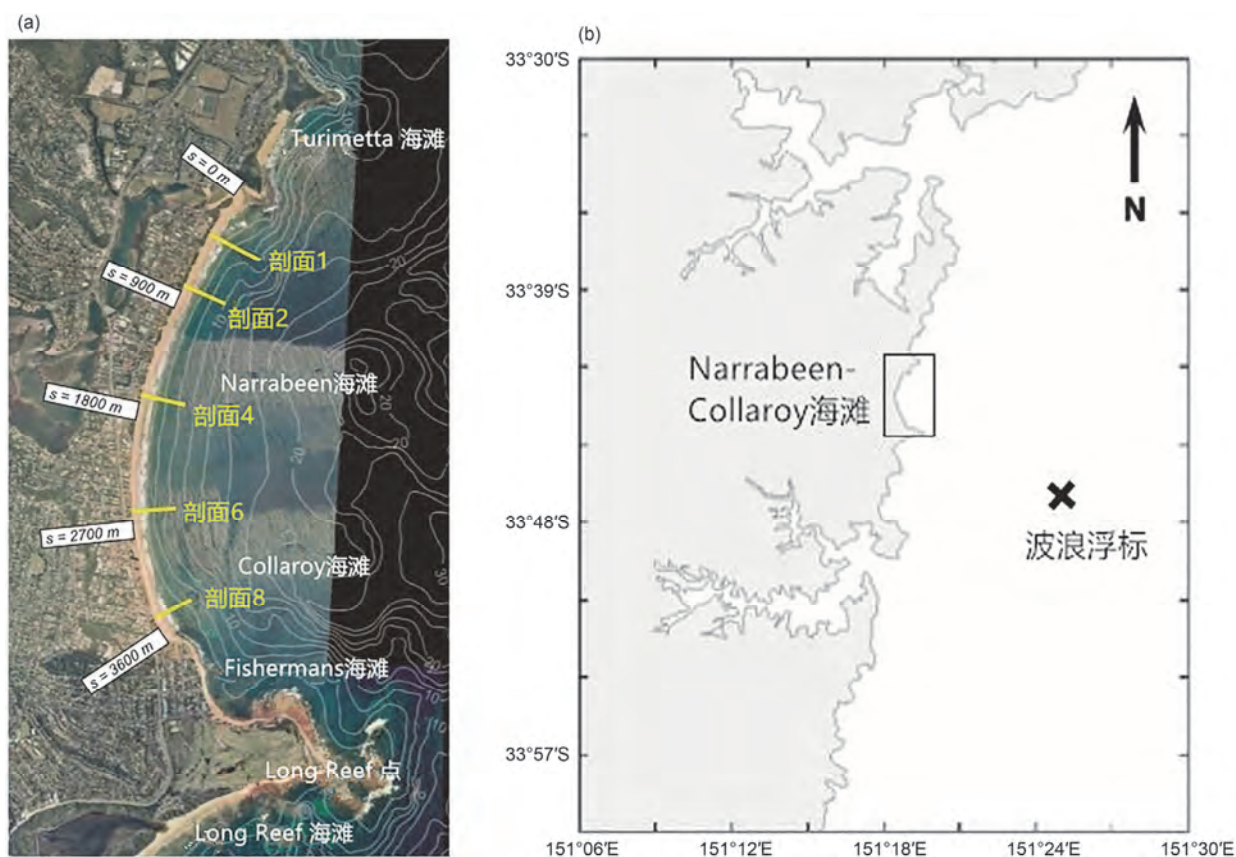


图1 (网络版彩色)研究区域概况. (a) Narrabeen海滩的航拍空中照片, 从北到南显示了有实测数据的剖面1、剖面2、剖面4、剖面6、剖面8五条剖面; (b) 该海滩在澳大利亚海岸的位置、以及有波浪实测资料的浮标位置^[21]

Figure 1 (Color online) Study domain general situation. (a) Aerial photograph of Narrabeen Beach, from north to south, shows 5 profiles names 1, 2, 4, 6, 8 with measured data; (b) the location of the beach on the Australian coast and the position of the wave buoy with the measured data^[21]

narrabeen.wrl.unsw.edu.au): 其中1976~2006年地形剖面数据由悉尼大学Short团队^[9]采用Emery方法^[22]测得, 该项数据离岸方向的测量间距为10 m, 最深到平均海平面以下4 m. Short团队选取了5条代表性剖面(图1(a)剖面1, 2, 4, 6和8沿岸分布间距平均约为750 m)进行了长期观测, 每次测量的时间间隔为1个月(平均间隔33天). 波浪数据采用距离海滩11 km、76 m水深处的波浪浮标(33°47'S, 151°25'E), 如图1(b). 波浪资料跨度从1992年3月起. 为了获取连续的高精度波浪数据, 澳大利亚天气与气候研究中心(CAWCR)^[23]用近岸波浪传播变形模型SWAN^[24]后报了1976~2014年的波浪传播至10 m水深处的情况, 数据输出的时间分辨率为1 h, 产品包括有效波高 H_s , 谱峰周期 T_p , 及平均波向 θ . 从数据的分布情况来看, 有效波高的数值介于0.25~9.5 m, 谱峰周期介于2~17s, 平均波向方位角介于0°~245°, 由于波周期在浅水域没有改变, 所以10 m水深处的波浪谱峰周期近似等于深水处波浪的谱峰周期. 1976年1月~2014年10月的天文潮数据基于1987~2012年附近HMAS验潮站(33°49'31.66"S, 151°15'30.71"E)的水位数据, 每15 min输出1次数据. (<http://narrabeen.wrl.unsw.edu.au>). 根据前人对Narrabeen海滩的研究(Karunaratna^[25], Davidson^[26], Lord和Kumlar^[27]), 定义该海域大浪过程为 $H_s \geq 3.0$ m, $H_s < 3.0$ m为常浪过程, 如此推出该海域的大浪事件. 经统计该海域发生大浪的年平均概率为0.24%.

3 数据分析和结果

3.1 一次典型的大浪事件

1997~1998年是极强的厄尔尼诺年^[28]. 1997年5月9~11日, Narrabeen海滩近岸波高特征呈现为持续50 h左右的大浪过程($H_s \geq 3.0$ m), 其中10日17:00~11日6:00, 有效波高 H_s 超过5.0 m. 为有历史资料以来波高之最; 也是该年Narrabeen海滩遭受的唯一1次大浪过程, 自此之后的10个月内再没大浪发生, 海滩呈恢复形态. 下文将针对Narrabeen海滩受大浪作用的侵蚀和其后常浪期的恢复过程, 从波况和剖面运动两方面分别进行详细描述.

3.2 波况

由图2可知, 5月9~11日, 近岸10 m水域大浪的有效波高自北向南递减; 12日以后的常浪期, 波高的空

间分布亦是呈此规律, 但波向较大浪期间略分散. 从图3可以明显看出, 海滩自北向南(剖面1~8)大浪的强度和持续时间不断减小, 但变化趋势相同, 即海滩北部(剖面1)大浪最先达到, 最后消散, 持续时间最长, 达54 h; 南部(剖面8)的大浪最后到达, 最先消散, 持续时间最短, 仅7 h. 波浪的方位角(以正北顺时针旋转起算)在90°~150°之间, 波浪从深水传入浅水后, 波向逐渐偏转, 在北部近岸波向近乎垂直入射, 但在南部则存在一定的夹角.

3.3 剖面运动

图4所示为5条剖面在大浪前后岸线位置的蚀淤情况, 因5月9~11日大浪对海滩的侵蚀作用, 各剖面5月15日的岸线位置较4月3日均大幅后退, 剖面1和8向陆侧后退距离最小, 剖面4和6次之, 岸线向岸侧移动最多的是剖面2. 而在5月15日后, 各剖面的岸线均呈向海侧移动的趋势, 这说明大浪对海滩剖面的影响正逐渐褪去, 常浪成为了海滩剖面蚀淤的主导动力. 7月30日以后, 北部剖面1、2和4的岸线向海侧大幅前进, 且均在10月份恢复到大浪前的岸线位置, 其中剖面1和4较大浪前的岸线位置进一步向海侧移动, 而南部剖面6和8在7月30日之后的蚀淤趋势与北部相反, 7~10月岸线逐渐向岸侧移动. 从图5看出, 恢复期内, 逐月的滨面泥沙量变化幅度随深水波长的增大而增加. 这说明小波高的长波利于滨面泥沙的堆积(详见图5).

4 分析与讨论

4.1 海滩岸线旋转的非偶然性

波浪作用下岬湾海滩蚀积特点在风暴潮和常浪期间具有明显的差异. 陈子燊^[29]在研究粤西水东湾的弧形海滩演变时指出, 风暴潮虽然引起海滩剖面的普遍侵蚀, 但由于海滩坡度的纵向变化导致侵蚀存在沿岸差异, 当风暴潮过后的常浪斜向入射时, 沿岸流所产生的沿岸泥沙输运使恢复期剖面的形态也存在沿岸差异, 进而产生岸线的旋转.

Short^[9], Ranasinghe^[10]等人在研究Narrabeen海滩的旋转(定义为北部岸线前进, 南部岸线后退)机理时, 发现南方涛动指数SOI影响着波高和波向, 从而引起了海滩南北蚀淤程度的不同. 其中, 南方涛动是指南太平洋和印度洋的海平面气压场呈反相变化,

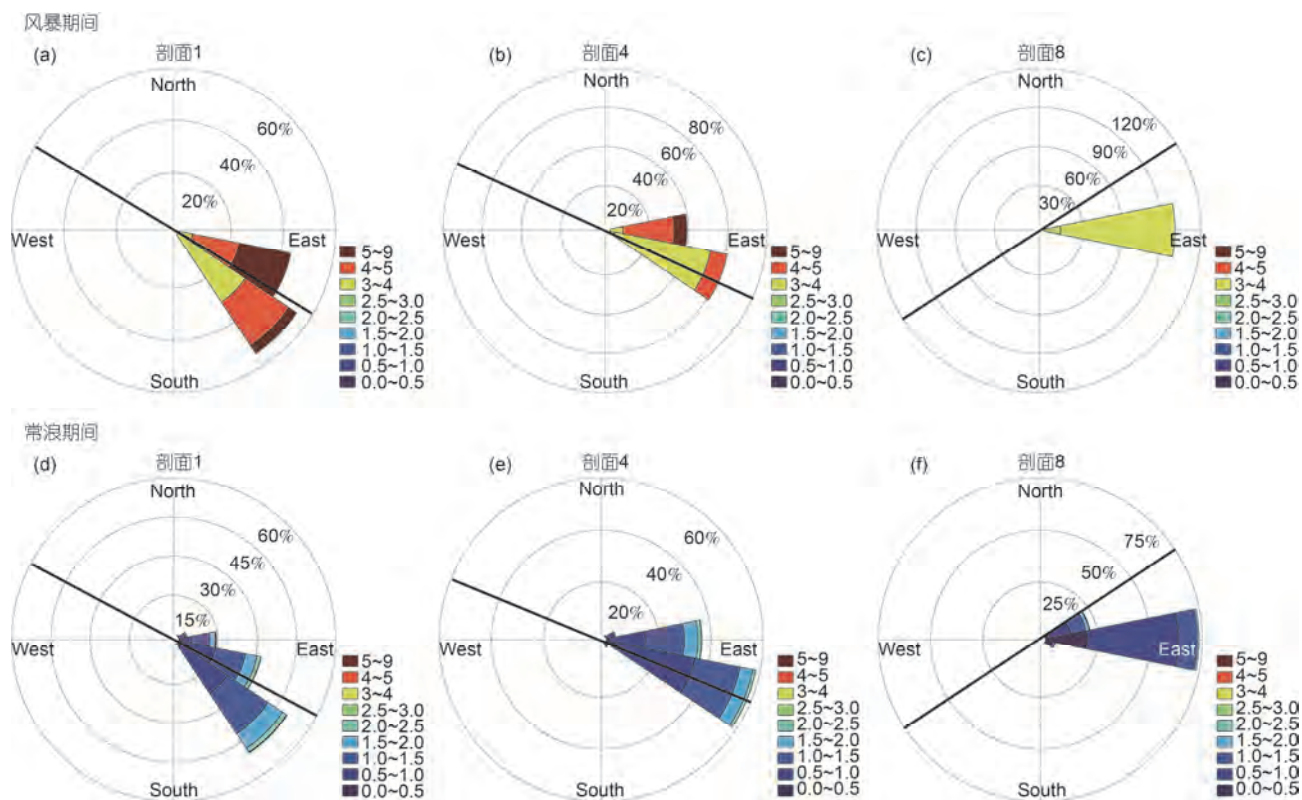


图2 (网络版彩色)波高玫瑰图。(a)~(c)分别代表了1997年5月9~11日大浪期间剖面1, 剖面4, 剖面8波高玫瑰图;(d)~(f)1997年5月12日~1998年2月13日常浪期间剖面1, 剖面4, 剖面8剖面波高玫瑰图;玫瑰图中实线表示对应的测量剖面走向, 单位为m

Figure 2 (Color online) Wave height rose chart. (a)~(c) is the profile 1, profile 4, profile 8 wave height rose chart during the May 1997. 9~11th huge wave event; (d)~(f) is the profile 1, profile 4, profile 8 wave height rose chart during May 12, 1997~February 13, 1998 post-huge wave event. The real line in rose graph indicates the corresponding measurement profile direction, unit is m

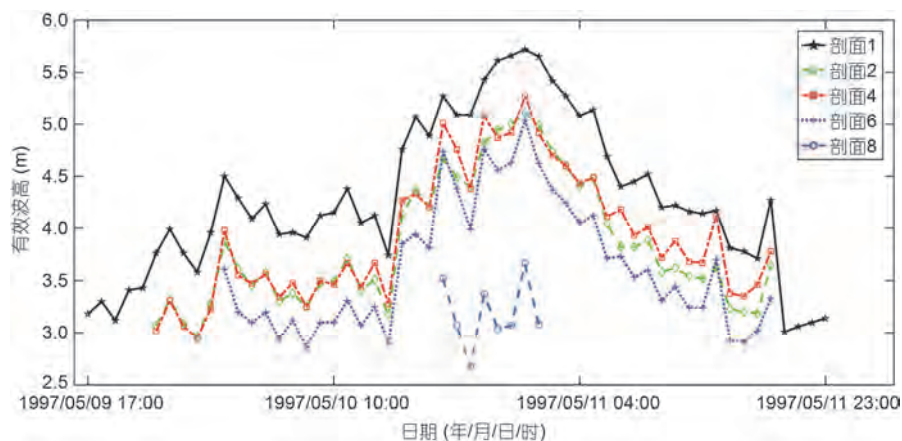


图3 (网络版彩色)大浪期间各剖面近岸10 m水深处有效波高数值及持续时间

Figure 3 (Color online) The value and duration of effective wave height in the depths of 10 m water in each profile during the huge wave event

即南太平洋气压升高(降低)时, 印度洋气压降低(升高), 南方涛动指数SOI定义为达尔文(Darwin)岛和塔希提(Tahiti)岛气压差的标准差。一般情况下, 南方

涛动指数为负时对应厄尔尼诺事件, 南方涛动指数为正时对应拉尼娜事件, 每月平均的SOI数据来自澳大利亚气象局。

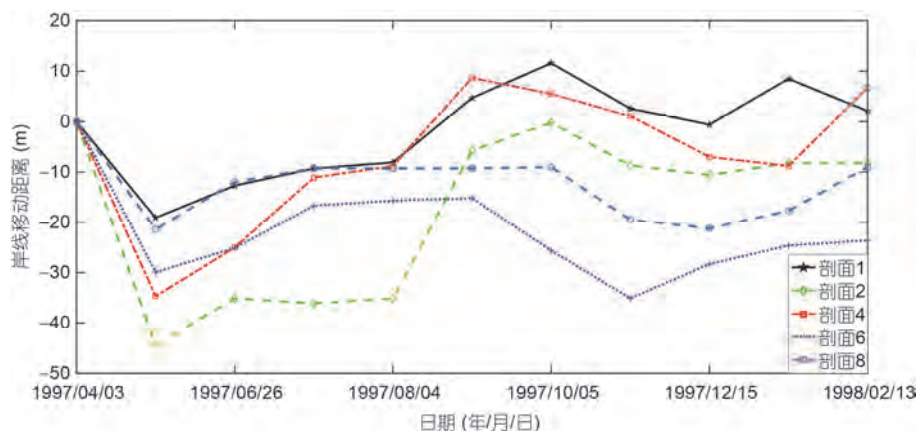


图4 (网络版彩色)1997年4月~1998年2月岸线位置变化. 5月9日大浪前最后1次测量4月3日的岸线均在零位置, 其后的岸线变化均为相对值

Figure 4 (Color online) January 1997–February 1998 shoreline position change. the last time before the huge wave event of May 9, the shore line of April 3 was at zero position, and the change of shoreline was relative value thereafter

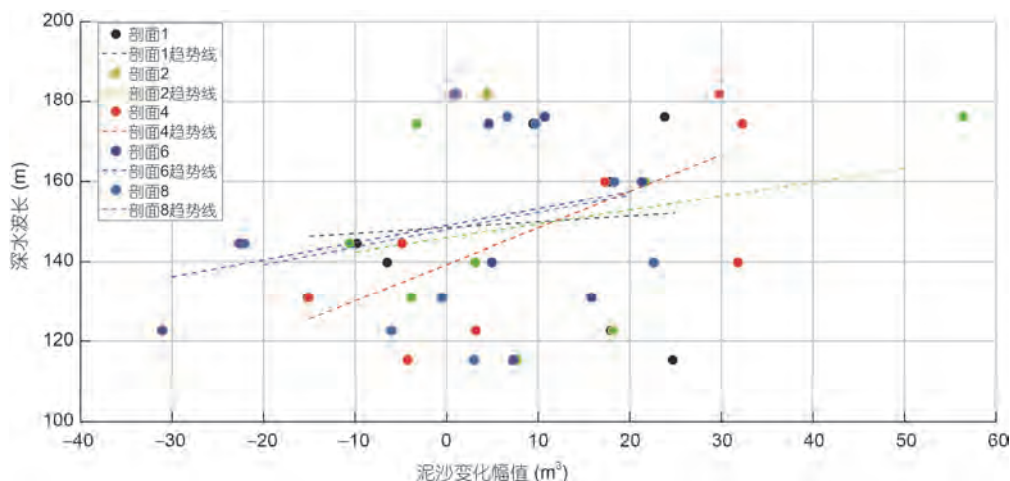


图5 (网络版彩色)常浪恢复期各剖面深水波长与滨面泥沙量关系. 横坐标为1997年6月~1998年2月逐月滨面泥沙量变化幅值, 纵坐标为月深水波长的前1/3大值

Figure 5 (Color online) The relationship between the sediment volume and offshore wave length of each profile in the period of post-huge wave. The X-axis is the sediment volume changes during June 1997–February 1998, the Y-axis is the first one-third large values of the monthly offshore wave length

Short等人^[9]揭示了海滩蚀积沿岸差异随SOI指数增减的变化情况, 本文通过对1997年大浪对海滩的侵蚀及其后的常浪恢复过程的研究发现, 海滩在该时段恢复期内呈顺时针旋转的趋势. 为了探究海滩旋转的规律及其是否具有周期性, 图6给出了北部剖面1、中部剖面4和南部剖面8在1990~2000年的岸线蚀淤情况, 其中, 岸线移动距离为正表示岸线向海侧延伸, 反之表示向陆侧延伸. 从图6看出, 在1998年4月前, SOI指数基本为负, 该海域呈现厄尔尼诺现象, 北部和中部岸线皆向海侧移动, 海滩体现为顺时针

旋转; 在1998年4月后, SOI指数开始为正值, 该海域呈现拉尼娜现象. 与此同时, 北部剖面岸线增长的幅值开始减弱, 海滩的顺时针旋转趋势减弱, 逆时针旋转趋势加强.

这10年中, 南半球澳大利亚东南部海岸温带气旋频发^[30], 图7反映了1990~2000年6次大浪事件前后岸线的旋转变化的. 其中, 1991年(b)和1999年(f)的大浪事件是由澳大利亚东海岸生成的温带气旋所引起的^[30,31]. 从图7(a)~(f)剖面图(1、4、8剖面依次代表北部、中部、南部)和俯瞰图可以清晰地看出大浪前后

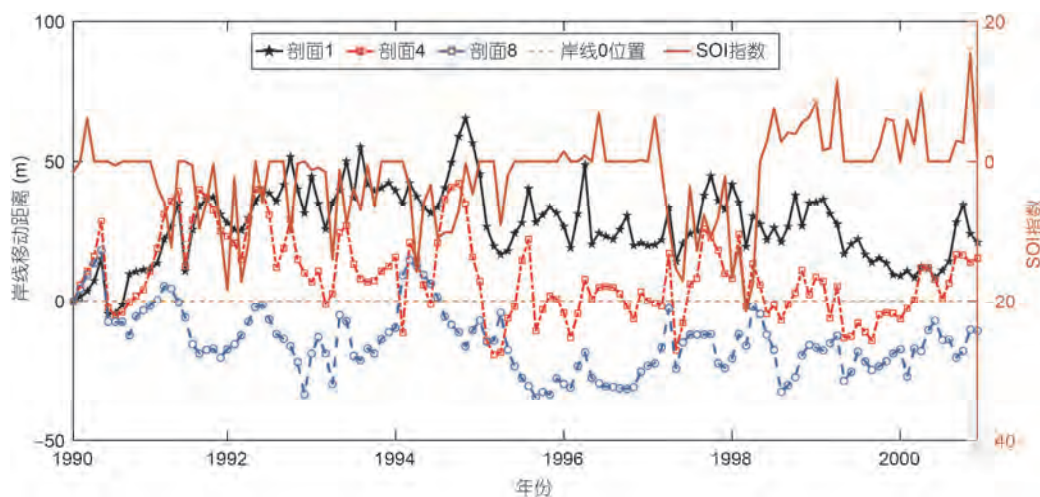


图6 (网络版彩色)1990~2000年岸线位置和SOI指数净变化

Figure 6 (Color online) 1990–2000 shoreline position and SOI index net change

各地区岸线的冲蚀情况以及岸线的旋转. 从图7各幅图看出剖面图和俯瞰图所反映的岸线冲蚀情况趋于一致, 岸线均有不同程度和不同方向上的旋转. 除图7(e)和(f)以外, 其余各图中岸线呈顺时针旋转, 即海滩北部岸线基本呈向海侧移动的趋势, 南侧岸线基本呈向陆侧移动的趋势. 中部剖面4则在各图中(图6和7)的变化幅值最接近于零, 接近岸线旋转的轴心.

结合图6和7可以看出, 当大浪发生在负SOI指数时期时, 在受侵蚀后的1~5个月常浪期内, 海滩岸线向海侧移动的距离为北部最大, 中部次之, 南部最小, 海滩呈顺时针旋转; 当大浪发生在正SOI指数期内, 在受侵蚀后的1~5个月常浪期内, 海滩南部向海侧移动速率最大, 北部最小, 海滩呈现逆时针旋转. 综合6次大浪过程可以发现: 由于SOI指数的增减, 南北冲淤特性随之发生改变, 从而海滩岸线旋转呈现周期性.

4.2 海滩岸线旋转的影响因素

以下分析重点讨论了1997年5月大浪前后海滩岸线旋转的影响因素. 1997~1998年发生了罕见的极端厄尔尼诺现象, 在1997年1月~1998年2月, Narrabeen海域浪向基本保持在东南向, 且这11个月内海滩仅受到1次有效波高大于3 m的大浪侵袭.

4.2.1 SOI指数与大浪之间的关系

拉尼娜现象(SOI>0)会引起澳大利亚东海岸海水表面温度上升, 为东海岸热带气旋的成长提供条件, 促使悉尼海岸东北向浪的生长($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$), 东北向入射

海滩的波浪会将泥沙沿岸向南输移, 堆积在岬湾南部, 引起海滩逆时针旋转; 而厄尔尼诺现象(SOI<0)后澳大利亚东海岸热带气旋的活跃程度大大减小, 由中纬度气旋产生的东南和南方向($90^{\circ}\sim 180^{\circ}$)涌浪成为塑造海滩剖面形态的主导因素, 东南及南向入射波浪将岬湾南部泥沙沿岸向北输移, 引起海滩顺时针旋转^[9].

4.2.2 SOI指数与岸线蚀淤相关性

图8比较了1997~1998年剖面1, 4和8岸线位置的月净变化情况. 所有剖面在1997年1月岸线位置均初始化为零, 以便讨论SOI指数对海滩岸线位置沿岸移动距离差异性的影响. SOI指数在3~5月大幅减小, 由拉尼娜现象转化为厄尔尼诺现象, 5月发生的大浪处于负SOI指数阶段. 1997年6~10月, 剖面1, 4和8的岸线均呈向海侧前进趋势, 而剖面1和4的前进距离远大于剖面8. 不同剖面对于SOI指数变化幅度的不同滞后效应, 导致了该海滩剖面蚀淤沿岸差异性, 从而产生海滩旋转现象.

图9显示了1997年1月~1998年2月北部剖面1, 中部剖面4, 南部剖面8的岸线位置净移动距离与SOI指数的时间序列互相关关系. 互相关性是指两个时间序列之间在任意两个不同时刻的取值之间的相关程度, 本文的互相关函数是描述剖面岸线与SOI指数在任意两个不同时刻的取值之间的相关程度. 可见, 北部剖面1与SOI指数呈负相关且滞后时间为4个月, 说明随着SOI指数增大, 海滩北部剖面1的岸线在4个月后会侵蚀后退; 中部剖面4与SOI指数也呈现负相关,

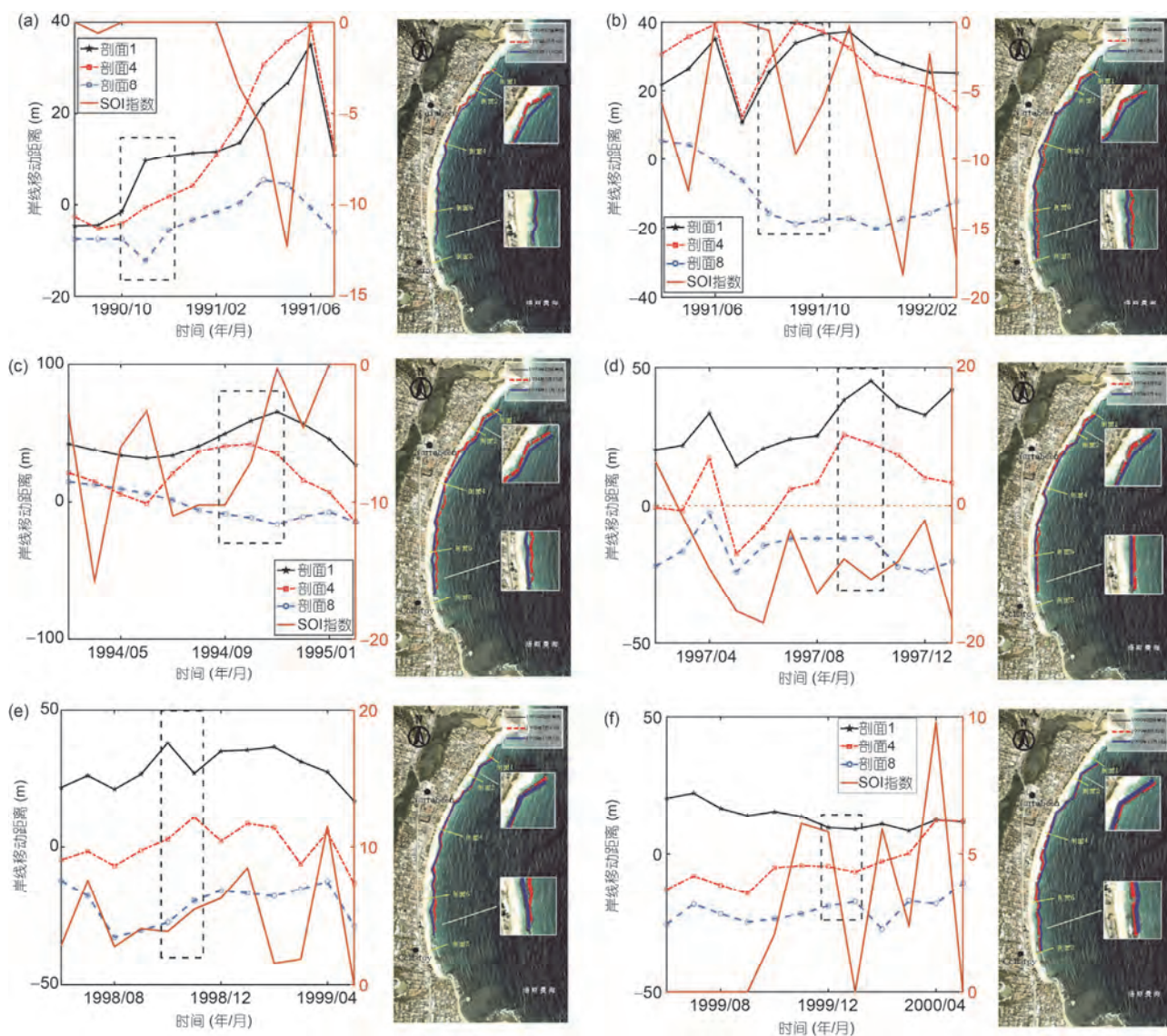


图7 (网络版彩色) 岸线旋转与SOI关系, 其中(a)~(f)是按时间顺序排列的6次大浪前后剖面1, 4, 8及SOI指数变化程度, 均历时12个月, 从大浪前3个月始至大浪后8个月止; 在每幅图中, 左图里的虚线框显示了岸线旋转幅度最大的时刻; 右图中岸线表示1990年初始岸线位置, 虚线表示大浪前岸线位置, 实线表示岸线旋转幅度最大时刻的岸线位置. 所选6次大浪过后均有长达10个月左右的常浪恢复期

Figure 7 (Color online) Beach rotation and SOI index, (a)~(f) are the amplitude of the 6 huge wave events profiles 1, 4, 8 and SOI in chronological order, which lasted for 12 months, from 3 months before the events to 8 months after the events. The shore line indicates the position of the shoreline in the early 1990, and the dotted line and solid line respectively indicate the position of the shoreline before the huge wave event and the largest variation after huge wave 1–5 months. The 6 events were selected to have a constant wave recovery period of up to 10 months

相关程度与北部剖面相似, 滞后时间也为4个月; 南部剖面8与SOI指数呈正相关且时间滞后为7个月, 说明SOI增大, 海滩南部剖面8的岸线在7个月后会淤积前进. 海滩在遭受大浪侵蚀后发生了明显的岸线旋转, 从图8看出, 主要的岸线差异性变动集中在1997年5~10月, 也就是大浪侵蚀后的5个月内发生了海滩的岸线旋转; 但在1997年12月~1998年2月, 岸线的移动幅度又趋于一致, 说明海滩又逆时针旋转回大

浪前岸线所在位置, 体现出岸线旋转的周期性.

5 结论

Narrabeen 海滩是典型的岬湾型沙质海滩, 长期处在大浪侵蚀和常浪恢复的循环反复动态平衡下. 本文以Narrabeen海滩为例, 分析了大浪事件前后岬湾型沙质岸滩岸线平面旋转的动态规律. 研究发现: 南方涛动指数(SOI)与海滩岸线的变化密切相关, 不

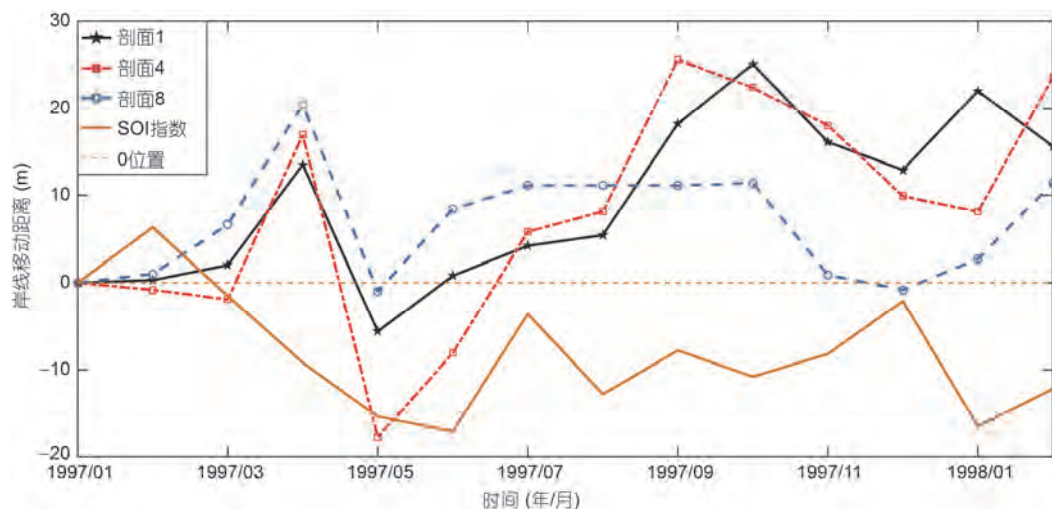


图8 (网络版彩色)1997~1998年剖面1, 4, 8的每月岸线位置净变化情况. 以1997年1月3条剖面初始岸线位置为零, SOI指数大于零为发生拉尼娜现象, 小于零为发生厄尔尼诺现象

Figure 8 (Color online) The net variation of the monthly shoreline position of profile 1, 4 and 8 in 1997–1998, with the initial shoreline position of three profiles of January 1997 as zero, the SOI index greater than 0 is the phenomenon of La Niña events, less than 0 is the occurrence of El Niño events

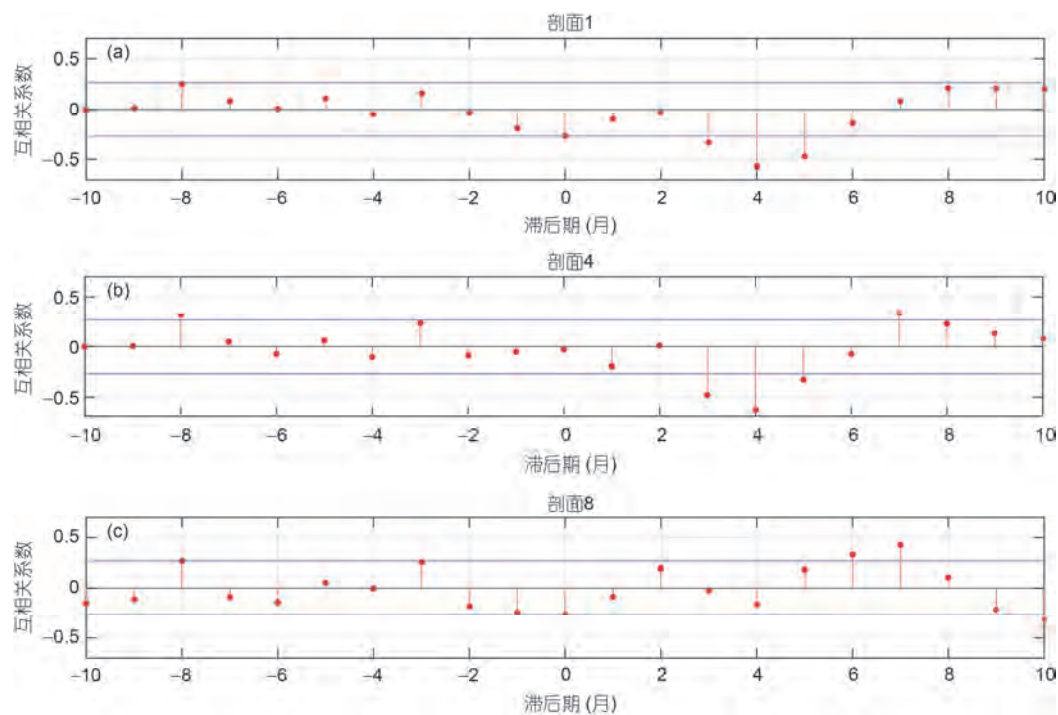


图9 (网络版彩色)1997年1月~1998年2月剖面1(a), 4(b), 8(c)月均岸线变化数值与月均SOI指数时间序列互相关性分析. 横坐标表示两时间序列相关性的延时, 互相关系数大于0.4时, 表示岸线净变化量与SOI指数相关

Figure 9 (Color online) Cross correlation coefficient between the monthly-averaged variation of the shoreline position and the monthly-averaged SOI index from January 1997 to February 1998 at profile 1(a), 4(b), 8(c). The horizontal axis indicates the delay in the correlation between two time series, the two time series are regarded as correlated as the correlation coefficient greater than 0.4

同位置的剖面之于SOI指数的响应事件不同, 导致了海滩旋转. 主要的发现概括如下:

(1) 在大浪影响下, 海滩呈现普遍侵蚀, 在常浪

作用下, 海滩逐渐淤积.

(2) 在常浪恢复期, 海滩岸线蚀淤对于SOI指数有滞后性, 且北部至中部剖面与SOI指数负相关, 南

部剖面与SOI指数正相关, 导致北蚀南淤, 从而岸线会发生旋转.

(3) 由于SOI指数的增减, 南北冲淤特性随之发生改变, 从而海滩岸线旋转呈现周期性.

致谢 感谢河海大学郑金海教授和赵红军博士对本文提供的建议.

参考文献

- Li Z L. The equilibrium morphology and erosion mechanism of sandy coast in Cape Bay (in Chinese). Doctor Dissertation. Guangzhou: Zhongshan University, 2006 [李志龙. 华南岬间海湾沙质海岸平衡形态与侵蚀机制. 博士学位论文. 广州: 中山大学, 2006]
- Feng X, Yi F, Cao H J, et al. Study on wave characteristics of nearshore area in the Radial Sand Ridges in the South Yellow Sea (in Chinese). *China Ocean Eng*, 2018, 36: 62–73 [冯曦, 易风, 曹海锦, 等. 南黄海辐射沙洲近岸海域波浪特性研究. *海洋工程*, 2018, 36: 62–73]
- Yuan J J, Feng X, Feng W B. Effects of radial sand ridges on tidal process in the South Yellow Sea (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2904–2918 [袁金金, 冯曦, 冯卫兵. 辐射沙洲地形对南黄海潮汐过程的影响. *科学通报*, 2018, 63: 2904–2918]
- Feng X, Olabarrieta M, Valle-Levinson A. Storm-induced semidiurnal perturbations to surges on the US Eastern Seaboard. *Cont Shelf Res*, 2016, 114: 54–71
- Zheng J, Zhang C, Demirbilek Z, et al. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction. *J Water Port Coast*, 2013, 140: 146–159
- Zhang C, Zhang Q, Zheng J H, et al. Parameterization of nearshore wave front slope. *Coast Eng*, 2017, 127: 80–87
- Feng Z, Wang Y H. Characteristics and controlling factors of middle and long term variation of beach beach section of Cape Bay—Taking Qingdao Shi Lao beach as an example(in Chinese). *Mar Sci*, 2016, 7: 100–109 [冯哲, 王永红. 岬湾海滩剖面中长期变化特征及其控制因素——以青岛石老人海滩为例. *海洋科学*, 2016, 7: 100–109]
- Splinter K D, Kearney E T, Turner I L. Drivers of alongshore variable dune erosion during a storm event: Observations and modelling. *Coast Eng*, 2018, 131: 31–41
- Short A D, Trembanis A C, Turner I L. Beach oscillation, rotation and the southern oscillation, Narrabeen beach, Australia. In: Edge B L, ed. *Article Collection of American Society of Civil Engineers 27th International Conference on Coastal Engineering*, Sydney. 2001. 2439–2452
- Ranasinghe R, McLoughlin R, Short A, et al. The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation. *Mar Geol*, 2004, 204: 273–287
- Lee G, Nicholls R J, Birkemeier W A. Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981–1991. *Mar Geol*, 1998, 148: 163–177
- Fritz H M, Blount C, Sokoloski R, et al. Hurricane Katrina storm surge distribution and field observations on the Mississippi Barrier Islands. *Estua Coast Shelf Sci*, 2007, 74: 12–20
- Fiore M M E, D'Onofrio E E, Pousa J L, et al. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Cont Shelf Res*, 2009, 29: 1643–1649
- Horn D P. Mesoscale beach processes. *Prog Phys Geog*, 2002, 26: 271–289
- Schwarzer K, Diesing M, Larson M, et al. Coastline evolution at different time scales-examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. *Mar Geol*, 2003, 194: 79–101
- Li Y, Lark M, Reeve D. Multi-scale variability of beach profiles at Duck: A wavelet analysis. *Coast Eng*, 2005, 52: 1133–1153
- Muñoz-Perez J J, Medina R. Comparison of long-, medium and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coast Eng*, 2010, 57: 241–251
- Short A D. *Beaches of the New South Wales Coast: A Guide to Their Nature, Characteristics, Surf and Safety*. Sydney: Sydney University Press, 2007
- Short A D, Trenaman N L. Wave climate of the Sydney region, an energetic and highly variable ocean wave regime. *Mar Freshwater Res*, 1992, 43: 765–791
- Turner I L, Harley M D, Short A D, et al. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Sci Data*, 2016, 3: 160024
- Harley M D, Turner I L, Short A D. New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross-shore processes. *J Geophys Res: Earth Surf*, 2015, 120: 1470–1484

- 22 Emery K O. A simple method of measuring beach profiles. *Limnol Oceanogr*, 1961, 6: 90–93
- 23 Harley M D, Turner I L. A simple data transformation technique for pre-processing survey data at embayed beaches. *Coast Eng*, 2008, 55: 63–68
- 24 Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1 Model description and validation. *J geophys res: Oceans*, 1999, 104: 7649–7666
- 25 Karunaratna H, Pender D, Ranasinghe R, et al. The effects of storm clustering on beach profile variability. *Mar Geol*, 2014, 348: 103–112
- 26 Davidson M A, Turner I L, Splinter K D, et al. Annual prediction of shoreline erosion and subsequent recovery. *Coast Eng*, 2017, 130: 14–25
- 27 Lord D, Kulmar M. The 1974 Storms Revisited: 25 Years Experience in Ocean Wave Measurement along the South-East Australian Coast. Edge B L, ed. *Article Collection of American Society of Civil Engineers 27th International Conference on Coastal Engineering*, Sydney, 2001: 559–572
- 28 Xie M E, Liu Y. Strong ENSO event 1997(in Chinese). *J Trop Meteor*, 1998 [解明恩, 刘瑜. 1997 年的强 ENSO 事件. *热带气象学报*, 1998, 14: 186–192]
- 29 Chen Z S. Response characteristics of curved coastal beach landforms to Typhoon waves. *Chin Sci Bull*, 1995, 40: 2168–2170 [陈子荣. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征. *科学通报*, 1995, 40: 2168–2170]
- 30 Yang Z F, Wang W D. The study of extratropical cyclones in the southern hemisphere winter half year near Australia (in Chinese). *J Appl Meteor*, 1995, 6: 43–49 [杨祖芳, 王文东. 南半球冬半年澳洲附近洋面上温带气旋的研究. *应用气象学报*, 1995, 6: 43–49]
- 31 Zhu S, Ma W M. Analysis of the southwest Pacific Ocean forecasting extratropical cyclone statistics (in Chinese). *Mar Forecasts*, 2001, 18: 45–52 [朱帅, 马卫民. 西南太平洋温带气旋统计分析. *海洋预报*, 2001, 18: 45–52]

Summary for “波浪作用下岬湾海滩蚀积特点：以澳大利亚 Narrabeen 海滩为例”

Characteristics of beach erosion in headland bays due to wave action: Taking the Narrabeen beach in Australia as an example

Yingtao Zhou¹, Xi Feng^{1,2*}, Weibing Guan² & Weibing Feng³

¹ Jiangsu Key Laboratory of Coast and Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;

² State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China;

³ College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

* Corresponding author, E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

The special cape-shaped topography of a headland sandy bay is the reason its shoreline varies differently than that of a straight-line coast. The Narrabeen embayment is located on the southeastern coastline of Australia approximately 20 km north of Sydney. The enclosed sandy beach is 3.6 km in length and is composed of fine to medium quartz sand overlying sandstone bedrock, with a median sand grain size D_{50} of 0.3 mm. Due to the prevalence of moderate to high wave energy conditions and the exposure of the central and northern portions of the beach to the prevailing south-southeastern swell waves. The morphodynamic responses of the Narrabeen beach are highly variable and rapid alongshore. The beach state was predominantly influenced by episodic storm events throughout the year when erosion and accretion can occur. This study analyzed measurements of cross-shore profiles of the Narrabeen headland sandy bay from 1997-1998. With reference to an atypical huge-wave event, this paper describes in detail the beach erosion caused by huge-waves and the beach restoration caused by small waves after the huge-wave event. It also details the relationship between shoreline variation and wave parameters (wave height and wave angle). To discuss the regulations and causes of beach rotation, the study selected six huge wave events that occurred in 1990–2000, all of which were followed by over eight months of small waves, and analyzed the alongshore variation. The results show that the morphodynamic responses of the Narrabeen beach are highly variable and rapid alongshore. During the huge wave events, the beach was eroded and the shoreline retreated. In the aftermath, the small waves restored the beach. The difference in the shoreline variation due to small waves exhibits a rotational pattern. Wave height is related to sand volume above mean sea level and sand accumulation was rapid and high after the big nearshore wave events. The Southern Oscillation Index (SOI) is closely related to the variability in the shoreline. Time-lagged cross-correlations between monthly beach shoreline positions and the SOI were calculated to investigate the presence of stronger cross-correlations between the beach shoreline and the SOI; the central profile (profile 4) is the most sensitive to the feedback of SOI change. The small waves after a huge-wave event make beach rotation periodic. Analysis of directional wave data and the SOI suggests that beach change is driven by changes in wave height (power) and a subtle change in wave direction, both of which are positively related to the SOI. The change in the SOI induces changes in the wave angles, which leads to sediment transport. This is the most important factor in beach rotation. These results reconfirm huge-wave and small waves subaerial morphology, in particular, these results confirm that the wave height and angle, which are induced by the SOI after a huge-wave event, are key drivers of alongshore variation in headland sandy bay coastlines. Under small wave conditions, the northern and mid beach profiles have negative correlations with SOI index, while the southern beach profiles have positive correlations with SOI index. This lead to sediment erosion in the north while sediment deposition in the south. And the shoreline thereby shows a rotational pattern. With the variation of the SOI index, the sediment movement changes in each beach profile, and the shoreline's rotational pattern shows periodicity.

headland beach, wave, beach erosion and restoration, coastline variation, beach rotation, SOI

doi: 10.1360/N972018-00376