日照北部重点海滩侵蚀现状与保护对策研究

孙佳璇[1,2], 郝 义[3*], 冯英明[3], 种衍飞[3], 李广雪[1,2], 刘闽祚[1,2]

（1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100；
2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100；
3. 山东省煤田地质局 第一勘探队, 山东 青岛 266427）

摘 要： 分析了日照海滨国家森林公园海滩和日照万平口海水浴场海滩剖面在“温比亚”“利奇马”两场台风过境前后的监测数据，认为台风是引起海滩侵蚀淤积的一个重要因素。海滨国家森林公园海滩 2 个探槽均表现出浅部样品的分选性优于深部的特点，南部探槽样品的分选性优于北部探槽；万平口海水浴场海滩 3 个探槽均表现出中部样品的分选性优于浅部和深部的特点，中部和南部探槽样品的分选性优于北部探槽。这些数据可为滩肩抛沙提供粒径依据。海滨国家森林公园海滩北部和万平口海水浴场海滩宜采用人工养滩和离岸潜堤相结合的方法，以达到海滩保护修复的目的，可实现生态环境影响较少，无损于视觉景观的效果。

关键词： 日照北部；海滩；侵蚀；淤积；修复保护

中图分类号： P736 **文献标志码：** A **文章编号：** 1002-3682(2023)02-0162-12

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220428002

引用格式： 孙佳璇, 郝义, 冯英明, 等. 日照北部重点海滩侵蚀现状与保护对策研究[J]. 海岸工程, 2023, 42(2)：162-173. SUN J X, HAO Y, FENG Y M, et al. Study on the current situation of erosion and protection measures of key beaches in northern Rizhao[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(2)：162-173.

海岸侵蚀是一种全球性的自然灾害，既破坏了海岸带生态平衡，也严重影响人类的生产生活，目前有关海岸侵蚀的研究是海岸带研究的热点。近年来，全球大量砂质海岸发生了侵蚀现象，山东半岛南部的砂质海岸侵蚀出现较早，其中日照砂质海岸侵蚀严重，引起了学者的广泛关注。已有学者对日照砂质海岸开展了相关研究，对其侵蚀现状进行了初步评价，但目前有关日照海滩侵蚀现状及演化过程的研究还不够深入，以定性分析海滩侵蚀位置[1]以及整体性分析鲁南砂质海岸[2]、山东半岛沿线现状[3]为主，而对日照海岸侵蚀所进行的定量化研究较少。研究发现，日照滨海海滩普遍存在滩面变窄和变陡[4]、滩面物质粗化、侵蚀陡坎频现[5]、老地层出露和人工建筑被破坏的现象[6]，不利于日照海岸带的进一步开发保护，此类海滩退化问题引起了关注并成为海岸工程研究的热点[7]。

对砂质海岸的研究始于研究海滩剖面，这一方面国外起步较早，随着中立点假说[8]、海滩平衡剖面概念[9]、Bruun 平衡剖面[10]的提出而相继完善。鲁南砂质海岸侵蚀是由入海泥沙量减少、前滨挖沙和海平面上升所导致的，且三者贡献比为 4∶5∶1[11]。20 世纪以来，学者和工程人员发现海滩抛沙不仅可以持续性地减缓海滩侵蚀，还能增加滨海娱乐空间和生物栖息地，这种“软式”策略逐渐成为海滩适应性保护和管理的主要举措[12]，这种保护方式称之为海滩养护。最早有记录的海滩养护

收稿日期： 2022-04-28

资助项目： 山东省自然资源厅 2021 年部省合作地质勘查项目 [鲁勘字(2021)57 号]；山东省煤田地质局 2019 年度科研专项奖励基金项目(201905)；山东省泰山学者计划(GXLI)

作者简介： 孙佳璇(1998—)，女，硕士研究生，主要从事对地观测方面研究. E-mail: 17866622783@163.com

***通信作者：** 郝 义(1982—)，男，高级工程师，主要从事矿产勘查和海洋地质调查方面研究. E-mail: chhy0533@163.com

（陈 靖 编辑）

工程于 20 世纪 20 年代发生在美国，经过几十年的发展，海滩养护于 1956 年被美国国会确定为海岸防护的重要措施，并成为砂质海岸修复的主流技术，得到广泛应用[13-14]。历经几十年的发展，海滩养护已被公认为砂质海岸可持续保护的最佳措施，在全球得到了广泛的应用[15-19]。

台风在海滩剖面演变中起着重要作用，台风引起的风暴增水及大浪可在短时间内造成海滩严重侵蚀及形态变化[20]，遭受台风强烈作用后的海滩需要长时间恢复，短则数月，长则数年，甚至形成永久性的破坏[21]。因此本文将对日照北部重点海滩在“温比亚”“利奇马”两场台风过境后的侵蚀情况进行分析，探究海滩对台风的响应特征，提出适宜的海滩养护及防护措施，为日照重点海滩的开发及养护提供科学参考。

1　研究区概况

本文研究对象为山东省日照市北部的 2 个重点海滩：海滨国家森林公园海滩和万平口海水浴场海滩。日照海滨国家森林公园海滩位于日照市北沿海路北首、日照海滨国家森林公园旅游景区内，海滩长 6.05 km, 宽 110～310 m，面积约为 1.3 km^2，属夷直型海滩。万平口海水浴场海滩位于海曲东路尽头、万平口海滨风景区内，海滩长 6.35 km, 宽 87～150 m，面积约为 1 km^2，属沙坝-潟湖型海滩。

2　研究方法与数据收集

2.1　海滩重复剖面测量

海滩的长期变化取决于泥沙的补给量和输出量；海滩的短时间变化则主要是由风暴潮、寒潮等极端天气或波浪的季节性变化导致的[19]。海滩剖面动态监测是海滩整治修复工程效果评价的基础性工作，同时也是工程实践中及时发现问题并提出解决方案的关键步骤[22-23]。

海滩重复剖面测量工作由山东省煤田地质局第一勘探队完成，使用山东省卫星定位连续运行综合应用服务系统（SDCORS 系统）的 RTK 测量模式，监测仪器为三鼎 GPS-RTK 双频接收机。仪器平面精度：±5 mm+1 ppm 高程精度：±10 mm+1 ppm，符合相关规范。平面坐标采用 CGCS2000 坐标系，高程采用 1985 国家高程基准。

观测时间为 2017 年 11 月至 2020 年 11 月，共重复测量 4 次，其中 2018 年、2019 年观测时间为“温比亚”“利奇马”台风过境后，记录了这 2 次台风过境的剖面记录。

对海滨国家森林公园和万平口海水浴场海滩布设的 6 条垂直岸线走向的监测剖面进行了测量（图 1），剖面长约 190～360 m，相邻剖面距离在 1.7～2.5 km（表 1）。重复观测剖面均从潮上带的沙堤、滩肩或人工建筑物开始，以垂直岸线方向向海延伸，以陆上两监测桩控制方向和引出高程，剖面向海端通常测到海图基准以下或黄海基准的 −0.5～−1.5 m 处。

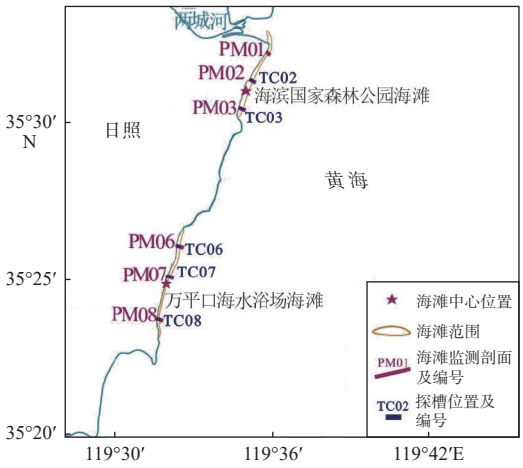


图 1　监测剖面及探槽位置分布

Fig. 1　Distribution of monitoring profile and exploratory trough

表 1 海滩重复观测剖面坐标位置信息

Table 1 Information list on the location of the coordinates of the beach re-observed profiles

剖面编号	位 置	起点坐标(CGCS2000 坐标系)		方位/(°)	长度/m	剖面间距/km
		X	*Y*			
PM01	海滨国家森林公园海滩北部	3 935 965.31	467 136.66	128	240	
PM02	海滨国家森林公园海滩中部	3 934 561.38	466 237.69	120	330	1.7
PM03	海滨国家森林公园海滩南部	3 932 893.65	465 576.49	112	360	
PM06	万平口海水浴场海滩北部	3 924 265.76	461 329.25	101	240	
PM07	万平口海水浴场海滩中部 3 号门	3 922 058.83	460 599.95	108	170	2.5
PM08	万平口海水浴场海滩南部 1 号门	3 919 514.80	459 883.11	120	190	

2.2 探槽施工

在靠岸一侧典型海滩的有利部位进行探槽施工，位置一般选在滩肩地势较高处。探槽尽可能地穿透砂层，以查明海滩的厚度、层序、物质组成、粒度变化等。在海滨国家森林公园海滩和万平口海水浴场海滩共施工了 TC02、TC03、TC06、TC07、TC08 五个探槽(图 1)，探槽大致位于重复观测剖面的起点附近。探槽深度为 2～3 m，槽口宽 2～3 m、长 4～5 m，槽底宽 0.5～1.0 m、长 1.0～1.5 m，呈开口大、底部小的倒锥形，槽壁平整。根据粒度及物质成分变化情况进行分层取样，样长一般为几 cm 到十几 cm 不等。使用三鼎 GPS-RTK 双频接收机对探槽起始点进行测量，高程采用 1985 国家高程基准。

3 海滩剖面变化特征

3.1 海滨国家森林公园

剖面 PM01、PM02、PM03 冲淤数据如表 2 所示，结合冲淤数据及 PM01、PM02、PM03 重复观测剖面图(图 2)可知。

表 2 2017 年 11 月—2020 年 11 月海滨国家森林公园海滩剖面冲淤数据

Table 2 Beach profile erosion and siltation data for the beach of Rizhao Beach National Forest Park from 2017-11 to 2020-11

冲淤量	剖面 PM01			剖面 PM02			剖面 PM03		
	后滨	高潮带	中低潮带	后滨	高潮带	中低潮带	后滨	高潮带	中低潮带
单宽冲淤量/($m^3 \cdot m^{-1}$)	−8.58	4.34	−19.25	6.88	12.48	−2.08	2.09	8.56	−5.06
平均冲淤量/($m^3 \cdot m^{-1}$)		−18.29			17.27			5.59	
区域冲淤量/m^3		−18 291			17 273			5 594	

注：正值为淤积、负值为侵蚀；区域冲淤量计算面积为剖面两侧 0.5 km 的区域；空白表示无数据。

1)PM01 海滩剖面总体处于侵蚀状态，局部小范围区域为淤积状态，从靠岸端到向海端侵蚀程度总体为强-弱-强的趋势(图 2a、表 2)。剖面 PM01 附近的侵蚀淤积作用受人类活动和自然因素的共同影响。PM01 剖面起点处已建防波堤，2017 年 11 月—2018 年 9 月，靠近防波堤处受侵蚀作用明显，剥蚀长度约 30 m、最大深度约 45 cm。根据以往研究结果，护岸设置不当会严重破坏岸线的自

然属性，造成局部泥沙发生不可逆流失[23]，认为该处侵蚀发生的原因是防波堤设置不当。2019 年 6 月—2020 年 8 月，滩肩至滩面处出现明显侵蚀与淤积交替出现的情况，原因可能是该处水动力条件较强，正、反射波浪共同作用影响导致海滩往复冲刷搬运，这进一步说明该处海滩存在一定的自我修复功能。

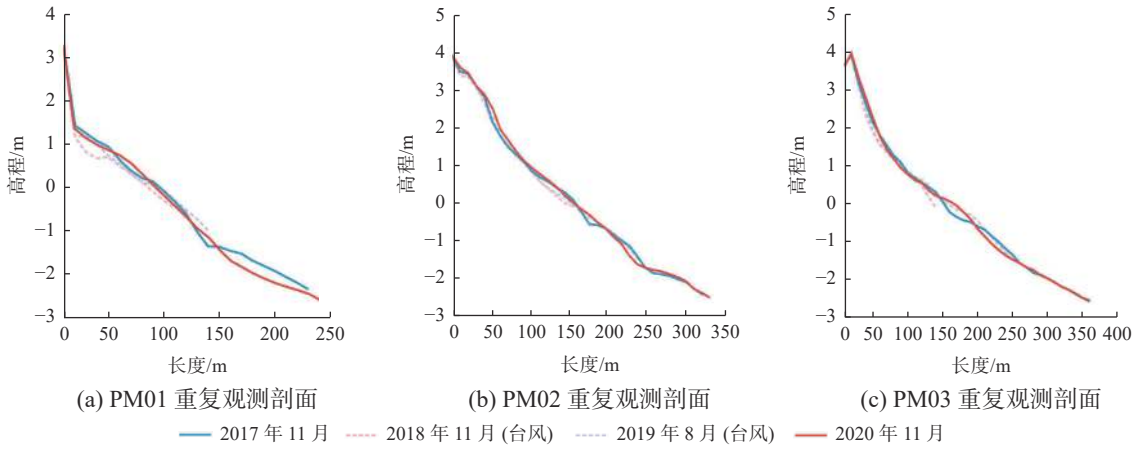


图 2　海滨国家森林公园重复观测剖面图

Fig. 2　Re-observed profiles of the beach of Rizhao Beach National Forest Park

2)PM02 海滩剖面总体较为稳定，滩肩处变化不大，滩面处存在侵蚀与淤积交替出现的情况，低潮线处相对稳定，从靠岸端到向海端侵蚀程度整体为弱-弱-强的趋势(图 2b、表 2)。

3)PM03 海滩剖面总体处于淤积状态，滩肩处变化不大，滩面处主要为淤积状态，低潮线处相对稳定，从靠岸端到向海端侵蚀程度整体为弱-弱-强的趋势(图 2c、表 2)。

我国多个省份都曾发生过极端气象灾害[24-28]，其中山东省是我国北方省份中遭受台风灾害的重灾区。台风“温比亚”过境期间(2018 年 8 月 19 日—20 日)，对海滩造成的影响较大，海滩各部分侵蚀最大值均发生在此期间。台风“利奇马”过境期间(2019 年 8 月 12 日—14 日)，滩肩处基本恢复到 2017 年 11 月受侵蚀之前的状态，淤积情况明显。通过 2 次台风过境海滩侵蚀状况的对比，说明台风是引起海滩侵蚀淤积的一个重要因素。推测台风带来的增水和大浪会在短期内增强海洋动力，将低潮线附近的泥沙颗粒推送到滩肩处，并带走滩面及低潮线附近的泥沙颗粒，使岸线发生后退并发育侵蚀陡坎。

3.2　万平口海水浴场

剖面 PM06、PM07、PM08 冲淤数据如表 3 所示，结合海滩剖面侵蚀数据及 PM06、PM07、PM08 重复观测剖面图(图 3)，可得出以下结果。

1)PM06 海滩剖面位于山海天旅游度假区，海域中有太公岛岛礁。该段总体处于侵蚀状态(图 3a)，从滩肩到高潮带较为稳定，中、低潮带处侵蚀情况最为严重，从靠岸端到向海端侵蚀程度整体为弱-弱-强的趋势(图 3a、表 3)。

2)PM07 海滩剖面位于万平口景区 3 号门北侧。该段滩面较窄，西侧为木栈道，滩肩宽度较小，总体处于侵蚀状态(图 3b)。从滩肩到高潮带较为稳定，中低潮带基本都处于侵蚀状态。从靠岸端到向海端侵蚀程度整体为弱-弱-强的趋势(图 3b、表 3)。

3)PM08 海滩剖面位于万平口景区 1 号门南侧，靠近泻湖堤坝处。西侧起点处为水泥路面，滩肩处有海滩排球场地，总体处于侵蚀状态(图 3c)。从滩肩到高潮带较为稳定，从高潮带到中低潮带都处于侵蚀状态，有越向海端侵蚀越严重的趋势(图 3c、表 3)。

表 3 2017 年 11 月—2020 年 11 月万平口海水浴场海滩剖面实测冲淤数据

Table 3 Measured erosion and siltation data from 2017-11 to 2020-11 for the beach profile at Wanpingkou Beach

冲淤量	剖面 PM06			剖面 PM07			剖面 PM08		
	后滨	高潮带	中低潮带	后滨	高潮带	中低潮带	后滨	高潮带	中低潮带
单宽冲淤量/($m^3 \cdot m^{-1}$)	1.79	3.30	−15.26	0.81	5.37	−21.91	5.77	15.41	−23.39
平均冲淤量/($m^3 \cdot m^{-1}$)		−10.17			−15.73			−2.21	
区域冲淤量/m^3		−10 167			−15 730			−2 210	

注：正值为淤积、负值为侵蚀；区域冲淤量计算面积为剖面两侧 0.5 km 的区域；空白表示无数据。

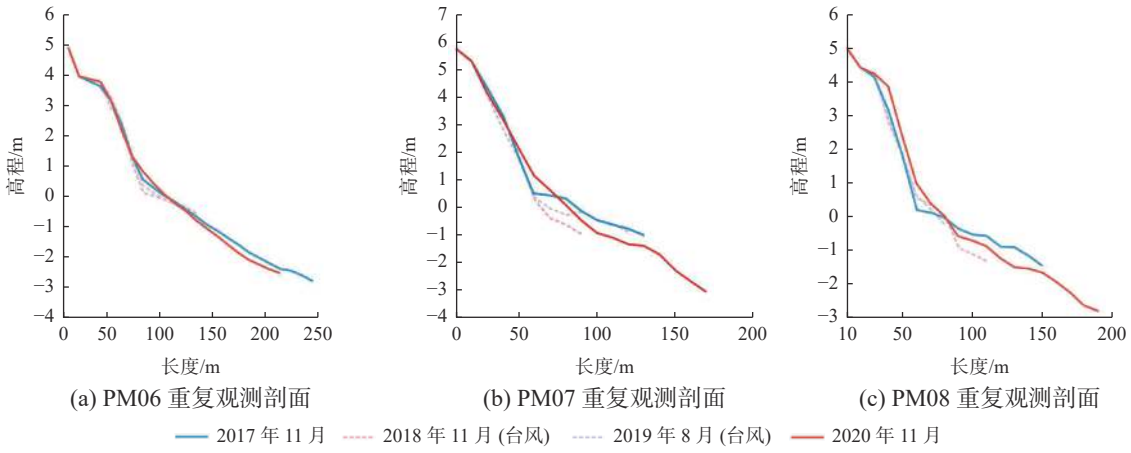


图 3 万平口海水浴场海滩重复观测剖面图

Fig. 3 Re-observed profiles of the beach at Wanpingkou Beach

台风“温比亚”和 “利奇马”过境期间，万平口海滩北部、中部、南部受影响最大的区域分别为高潮线附近、高潮线东侧、低潮线东侧，分区实测数据如表 4 所示。台风过后，万平口海水浴场海滩北部及中部存在一定自我修复功能，但仍处于侵蚀状态。台风过境后海滩南部局部出现急剧下切的原因可能是受堤坝正、反射波浪的影响，水动力条件较强，对海底造成的掏蚀扰动情况较为显著。南部海滩未出现自我修复，可能与该处修建“黄海之眼”工程，改变了附近海域的水动力条件，同时利用了该处部分海砂作为建筑用砂有关。

表 4 台风“温比亚”和 “利奇马”过境期间对万平口海滩的影响

Table 4 Impacts of Typhoon Rumbia and Lekima on the northern, central and southern parts of Wanpingkou Beach

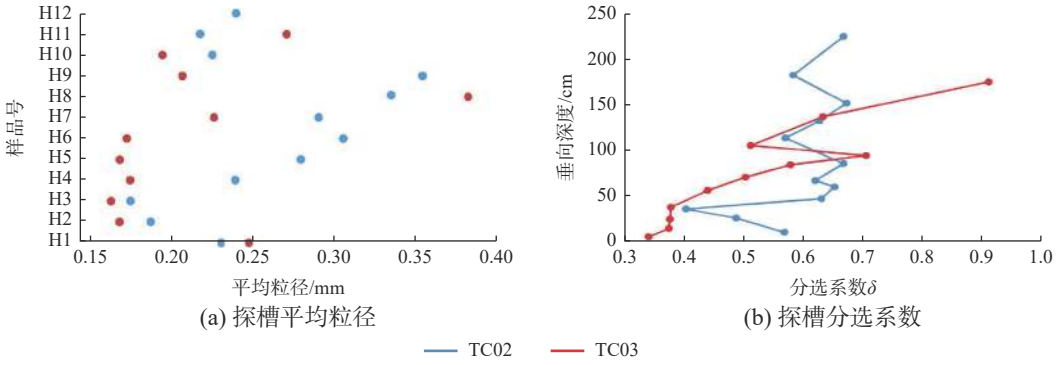
变化情况	台风“温比亚”			台风“利奇马”		
	北部高潮线	中部高潮线东侧	南部低潮线东侧	北部高潮线	中部高潮线东侧	南部低潮线东侧
下切深度/cm	45	100	100	30	70	70
侵蚀长度/m	40	40	10	45	35	30

4 沉积物粒度参数特征

4.1 海滨国家森林公园探槽粒径

TC02 探槽的粒径介于 0.18～0.36 mm，TC03 探槽的粒径介于 0.17～0.38 mm(图 4a)，平均粒径

变化较小，以细砂、中砂为主，粒径从浅到深均较细，呈先增大后减小的趋势。TC02 探槽样品的分选系数主要介于 0.40～0.67，平均值为 0.60，分选状况好；TC03 探槽样品的分选系数主要介于 0.34～0.91，平均值为 0.52，分选状况好（图 4b）。综上所述，森林公园 TC03 探槽样品的分选性要好于 TC02 探槽，并且 2 个探槽均表现出浅部样品的分选性要好于深部的特点。



(a) 探槽平均粒径　　(b) 探槽分选系数

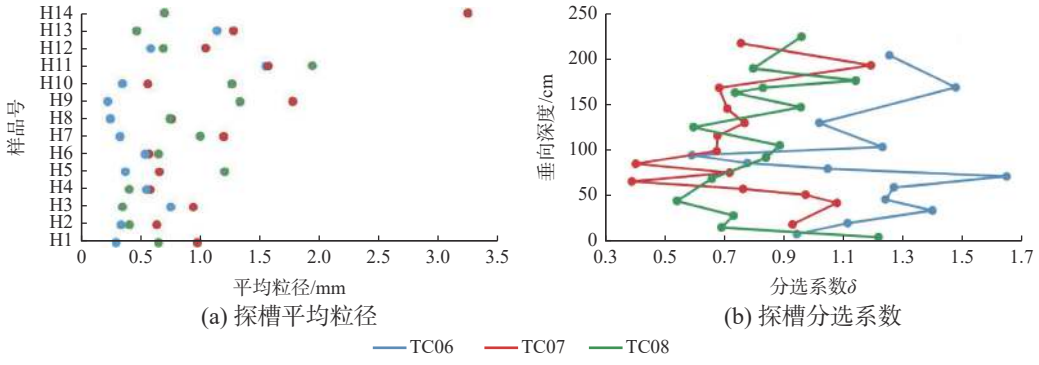
注：探槽样品为自上而下取样，样品号为 H1～H12。

图 4　日照海滨国家森林公园海滩探槽数据

Fig. 4　Beach Probe data of the beach of Rizhao Beach National Forest Park

4.2　万平口海水浴场探槽粒径

万平口海水浴场海滩探槽的平均粒径变化较大，TC06 的粒径介于 0.22～1.55 mm，TC07 的粒径介于 0.55～3.25 mm，TC08 的粒径介于 0.36～1.97 mm（图 5a），以中砂、粗砂、细砾为主，粒径由浅到深变化较大，总体呈浅部细深部粗的趋势。万平口海水浴场海滩北部 TC06 探槽的分选系数介于 0.59～1.65，平均值为 1.16，分选状况较差；中部 TC07 探槽的分选系数介于 0.39～1.19，平均值为 0.76，分选状况中等；南部 TC08 探槽的分选系数介于 0.53～1.22，平均值为 0.83，分选状况中等（图 5b）。综上所述，万平口海水浴场海滩 TC07、TC08 探槽样品的分选性要好于 TC06 探槽，3 个探槽中均表现出中间样品的分选性要好于浅部和深部的特点。



(a) 探槽平均粒径　　(b) 探槽分选系数

注：探槽样品为自上而下取样，样品号为 H1～H14。

图 5　万平口海水浴场海滩探槽数据

Fig. 5　Probe flume data at Wanpingkou Beach

5　重点海滩防护措施探讨

5.1　软性防护措施

抛沙养滩作为一种最有效的防护措施，是海滩养护各道工序的主要任务。向海滩抛沙的质量、

时间、位置以及硬工程的配合程度均与原滩动力环境、动态速率和新滩寿命有一定制约关系。抛沙养滩的方式主要有滩肩补沙、滩面补沙、水下补沙和沙丘补沙四种[27]。设计得当的大量抛沙一年后再发育新的平衡剖面，相当于海滩平衡剖面平行外移，达到增宽和稳岸的目的[12]。滩肩是海滩主要旅游休闲场地，也是海滩淤蚀动态的风向标，宽阔而致密的滩肩可在一定程度上减缓风浪的侵蚀，利于涌浪的淤沙[29]。滩肩抛沙具有沙量省、运程短、见效快等诸多优点，能保护海岸线附近的结构和建筑区域，虽不能消除导致侵蚀的物理因素，但会逐渐减轻其影响，常用于砂质海滩旅游区、海滨浴场的维护[30-31]。

根据研究区实际情况，建议采取滩肩补沙的方式进行人工养滩。将补给泥沙堆积在平均潮位以上，此方法可显著增加干滩宽度，抛沙技术难度中等，为目前较为常用的抛沙方案，缺点是此位置沙的活动性较大，极端天气情况下沙流失量较大，需加强抛沙后对海滩剖面的定期观测和周期性补沙[32]。确定抛沙成分时要与浪力相适应，补沙平均粒径大小的基本原则为填充沙平均粒径要等于或略粗于工程区天然海滩砂[33]，这样不至于被海水运移而带出海滩。

结合海滩以往研究资料①与本文探槽粒径测量，海滨国家森林公园海滩探槽的平均粒径为 0.17～0.38 mm，万平口海水浴场海滩探槽的平均粒径为 0.22～3.25 mm。因此海滨国家森林公园海滩北部初步设计填砂粒径按 0.2～0.4 mm；万平口海水浴场海滩中部初步设计填砂粒径按 0.5～3.5 mm。从恢复往日海滩或构建更宽海滩的角度出发，在海滩重建阶段就应该抛以较大数量的沙，即抛沙量大于抛沙前若干年的总侵蚀量。参考 2017 年 11 月—2020 年 11 月期间研究区海滩重复观测剖面形态，进行抛沙量估算。

1）2017 年 11 月—2020 年 11 月期间，海滨国家森林公园海滩北部实测断面的单宽侵蚀量约为 18.29 m^3/m，可采用人工补沙的方式修复海滩。设计抛砂粒径为 0.2～0.4 mm，根据滩肩高度 3.28 m，设计抛沙顶标高为 3.3 m，略高于滩肩高度。根据美国《海岸工程手册》[34]，针对不同粒径推荐的坡度选择，滩肩按坡度 1∶100，抛沙位置在平均高潮线以上。

参考蔡锋等提出的滩肩补沙方式模型[35]，初步设计剖面与现地形对比如图 6a 所示。根据对比计算，设计单宽抛沙量为 59.52 m^3/m，按从断面向两侧各推 0.5 km 的长度计算，海滨国家森林公园海滩北部区域的抛沙量约为 59 520.0 m^3。

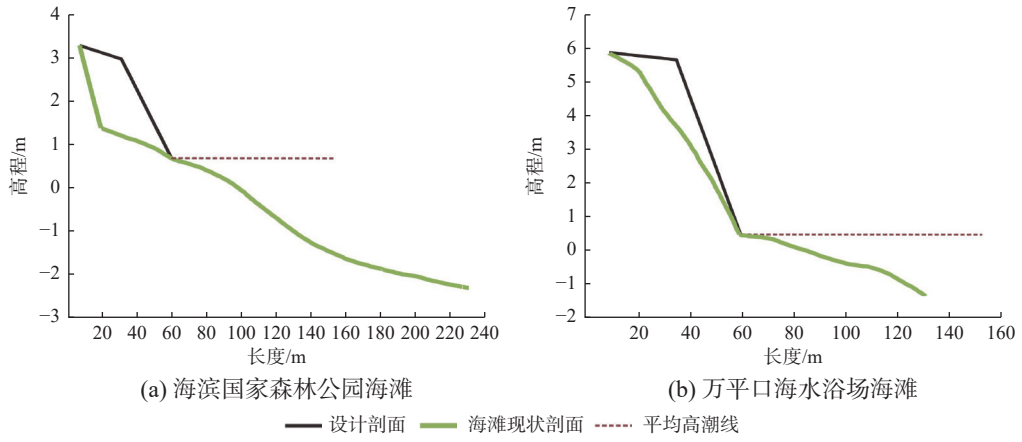


图 6 海滩设计剖面

Fig. 6 Designed beach profiles

① 山东省煤田地质局第一勘探队. 日照市海岸带沙滩调查及侵蚀现状研究报告, 2021 年 7 月.

2）2017 年 11 月—2020 年 11 月期间，万平口海水浴场海滩中部实测断面的单宽侵蚀量为 15.73 m^3/m，可采用人工补沙的方式修复海滩。设计抛砂粒径按 0.5～3.5 mm，根据滩肩高度 5.77 m，设计海滩顶标高为 6.0 m，略高于滩肩高度。根据美国《海岸工程手册》[34]，针对不同粒径推荐的坡度选择，滩肩按天然海滩坡度 1∶100，抛沙位置在平均高潮线以上。初步设计剖面与现地形对比如图 6b 所示。根据对比计算，设计单宽抛沙量为 41.24 m^3/m，按从断面向两侧各推 0.5 km 的长度计算，万平口海水浴场海滩中部区域的抛沙量约为 41 240.0 m^3。

5.2　硬性防护措施

岬湾海岸是一种稳定的海岸存在形式，在天然海岸中岬湾地貌占 51%[36]。当海滩达到静态平衡时，无需沿岸输沙或人工填沙，岸线即可保持长期稳定[37]。静态平衡岬湾可有效降低波浪的影响，减小波生流对海滩的侵蚀作用。离岸潜堤具有填沙量小、淹没于水中不影响旅游观光效果等优点[38]。离岸潜堤不与陆地相连，突出海底而潜没于水中，可使波浪产生碎波、分裂，抑制堤背后的透过波能，减少海滩侵蚀，间接发挥稳定海滩作用，因其对海水循环和生态环境影响小，逐渐被推广采用[39]。

波浪作用是日照市海岸带海滩泥沙运动的重要动力条件，而附近涉海工程和人工养殖场的建设在一定程度上改变了日照海岸带水域来波方向和沿岸波高分布，对日照海岸带岸线蚀退有较大影响。因此，海岸防护工程的设计目的应为消减影响该区的波浪，保护岸滩环境。针对海滨国家森林公园海滩及万平口海水浴场海滩各自的波浪特点建议采取以下 2 种海岸防护工程。

1）建议海滨国家森林公园北部海滩采用人工养滩和离岸潜堤结合的方法（图 7），构成一种静态平衡岬湾的布置。为此，岸线治理方案利用现有的防波堤，根据以往研究的经验值设置离岸潜堤[35,39]，新建三段离岸潜堤，总体轴线方向与岸线基本平行，位于水深大约 5 m 等深线处，距岸约 1 km，离岸堤采用抛石斜坡堤式结构，避免离岸堤前方发生掏蚀。每条离岸潜堤长 200 m，堤间口门宽 120 m。三段离岸堤自北向南分段实施，各段建成后，在一定时期内对岸滩进行观测，根据观测期的实际防护效果逐步实施。

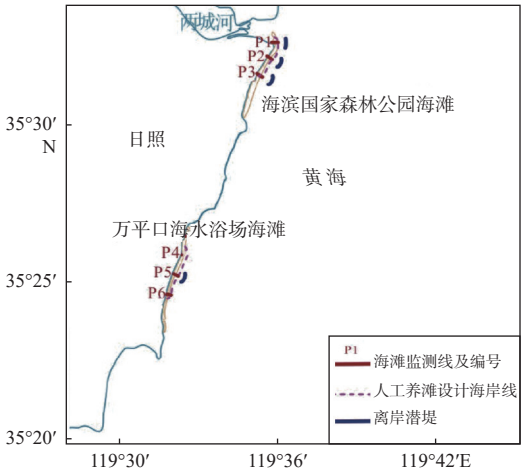


图 7　海滨国家森林公园北部海滩及万平口海水浴场中部海滩保护对策示意图

Fig. 7　Diagram of the protection measures for the northern of the beach of Rizhao Beach National Forest Park and the central beach of Wanpingkou Beach

2）建议对万平口海水浴场海滩采用人工养滩和人工岬湾结合的方法（图 7），利用北部的太公岛和南部潟湖口北侧的堤坝形成岬湾。由于万平口海水浴场海滩整体侵蚀较为严重，根据以往研究的经验值设置离岸潜堤[35,39]，在海滩的北部、中部、南部分别新建离岸潜堤。潜堤设置在水深 5.0 m 处，距岸约 1 km，堤长约 300～500 m，间隔约 1～2 km，根据绕射效果适当修订，堤顶最小水深约 1 m，为混凝土消波块透水结构。离岸潜堤平行于海岸且独立于海中，突出海底且潜没于水中，对海水循环影响较小，对生态环境影响较少，加上结构物不露出水面，无损于视觉景观[39]。

6　结　论

利用海滩重复剖面测量及探槽粒径测量所获取的冲淤数据、探槽粒径变化实测数据，分析了日

照 2 个重点海滩的侵蚀现状及侵蚀原因，并根据各海滩的实际情况因地制宜地确定防护措施，以达到对海滩进行长期稳定防护的同时对自然环境影响最小的目的，主要结论如下。

1)海滨国家森林公园海滩北部处于侵蚀状态，中部相对稳定，南部处于淤积状态；万平口海水浴场海滩，由北向南侵蚀程度逐渐减弱。受台风过境影响，海滨国家森林公园海滩在“温比亚”过境后严重侵蚀，“利奇马”过境后基本恢复到台风前的状态；万平口海水浴场海滩北部及中部存在一定自我修复功能，但总体岸滩剖面仍处于侵蚀状态，说明台风是引起海滩侵蚀淤积的一个重要因素。

2)海滨国家森林公园海滩 TC03 探槽样品的分选性要好于 TC02 探槽，并且 2 个探槽中均表现出浅部样品的分选性要好于深部的特点；万平口海水浴场海滩 TC07、TC08 探槽样品的分选性要好于 TC06 探槽，3 个探槽中均表现出中间样品的分选性要好于浅部和深部的特点。探槽中样品的粒度参数特征为人工抛沙提供了参考依据。

3)海滨国家森林公园北部海滩和万平口海水浴场海滩宜采用人工养滩和离岸潜堤相结合的方法，构成一种静态平衡岬湾的布置，以达到海滩保护修复的目的，在人工抛沙的基础上，再设置 3 个离岸潜堤，可以起到消浪促淤的作用，并实现生态环境影响较少、无损于视觉景观的目的。

参考文献 (References):

[1] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. GONG L X. Erosion situation and protection of beach in eastern part of Shandong peninsula[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[2] 崔承琦. 石臼湾及其附近海岸地貌特征[J]. 山东海洋学院学报, 1983, 13(2): 67-80. CUI C Q. Geomorphological charicteristics of the Shijiu Bay and it’s neighbouring shore[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1983, 13(2): 67-80.

[3] 李广雪, 宫立新, 杨继超, 等. 山东滨海沙滩侵蚀状态与保护对策[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 35-46. LI G X, GONG L X, YANG J C, et al. Beach erosion along the coast of Shandong Province and protection countermeasures[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(5): 35-46.

[4] 王琦, 吕亚男, 张建华. 山东省日照县近岸沉积物的物质来源及扩散方向[J]. 山东海洋学院学报, 1978(2): 41-50. WANG Q, LÜ Y N, ZHANG J H. Material source and diffusion direction of coastal sediments in Rizhao, Shandong Province[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1978(2): 41-50.

[5] 种晴晴. 基于遥感的日照海岸线变迁分析[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2016. CHONG Q Q. Analysis of Rizhao coastline change based on remote sensing[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2016.

[6] 种衍飞, 郝义. 日照海岸带沙滩侵蚀现状及沉积物粒度特征分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(1): 19-29. CHONG Y F, HAO Y. Grain size distribution patterns of the Rizhao coast and their bearing on coastal erosion[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(1): 19-29.

[7] 李平, 杜军, 张志卫, 等. 粤东南澳岛青澳海滩侵蚀退化风险评价及其安全调控[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 171-181. LI P, DU J, ZHANG Z W, et al. Erosion risk assessment and safety regulatory of Qing’ao beach in the Nan’ao Island, Guangdong Province[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 171-181.

[8] 柯马尔, 邱建立, 庄振业. 海滩过程与沉积作用[M]. 北京: 海洋出版杜, 1985, 234. KE M E, QIU J L, ZHUANG Z Y. Beach processes and sedimentation[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985, 234.

[9] LARSON M, KRAUS N C, ROSATI J D. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change [R]. US Army Corps of Engineers, 1989.

[10] BRUUN P. Coast erosion and the development of beach profiles[R]. US Army Engineer Waterways Experiment Station. Beach Erosion Board Technical Memo, No. 44, 1954.

[11] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010. CHEN J Y. Summary of coastal erosion in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.

[12] PRANZINI E, WETZEL L, WILLIAMS A T. Aspects of coastal erosion and protection in Europe[J]. Journal of

Coastal Conservation, 2015, 19(4): 445-459.

[13] HANSON H, BRAMPTON A, CAPOBIANCO M, et al. Beach nourishment projects, practices, and objectives-a European overview[J]. Coastal Engineering, 2002, 47(2): 81-111.

[14] HAMM L, CAPOBIANCO M, DETTE H H, et al. A summary of European experience with shore nourishment[J]. Coastal Engineering, 2002, 47(2): 237-264.

[15] COOKE B C, JONES A R, GOODWIN I D, et al. Nourishment practices on Australian sandy beaches: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 319-327.

[16] LUO S, CAI F, LIU H, et al. Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People's Republic of China[J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 103: 134-145.

[17] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(4): 452-463. CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(4): 452-463.

[18] 王广禄. 海湾沙滩修复研究[D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2008. WANG G L. The study of bay beach restoration and nourishment[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2008.

[19] 钟超. 烟大沙滩剖面演变过程及稳定性分析研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021. ZHONG C. The evolution process and stability analysis of the Yanda Beach profile[D]. Yantai: Ludong University, 2021.

[20] 王立杨, 付玉成, 杨丽中, 等. 台风“利奇马”对威海楮岛海滩演化过程的影响[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(4): 608-617. WANG L Y, FU Y C, YANG L Z, et al. Effects of typhoon on the evolution of Chudao Beach in Weihai[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(4): 608-617.

[21] 郭俊丽, 时连强, 童宵岭, 等. 浙江朱家尖岛东沙海滩对热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 137-147. GUO J L, SHI L Q, TONG X L, et al. The response to tropical storm Nakri and the restoration of Dongsha Beach in Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 137-147.

[22] 陈秋明, 黄发明, 宋鹏. 无人机及三维激光扫描仪技术在沙滩剖面动态监测中的应用及测量精度分析[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(3): 529-539. CHEN Q M, HUANG F M, SONG P. Application of UAV and 3D laser scanner technology in beach profile dynamic monitoring and analysis of measuring accuracy[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(3): 529-539.

[23] 唐筱宁, 王绿卿, 杨锦凌. 护岸工程与沙滩流失[J]. 海岸工程, 2015, 34(2): 33-39. TANG X N, WANG L Q, YANG J L. Revetment Construction and Beach Erosion[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(2): 33-39.

[24] 邵超, 戚洪帅, 蔡锋, 等. 海滩-珊瑚礁系统风暴响应特征研究——以1409号台风“威马逊”对清澜港海岸影响为例[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 121-130. SHAO C, QI H S, CAI F, et al. Study on storm-effects on beach-coral reef system: taking the response of Qinglangang Coast on No. 1409 Typhoon Rammasun as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 121-130.

[25] 戴亚南, 张鹰. 江苏沿海地区海洋灾害类型及其防治探讨[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1417-1420. DAI Y N, ZHANG Y. Marine disasters and strategy for damage mitigation in coastal zone of Jiangsu[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1417-1420.

[26] 陈雪英, 王文海, 吴桑云. 近年风暴潮对山东海岸及海岸工程的影响[J]. 海岸工程, 2000, 19(2): 1-5. CHNE X Y, WANG W H, WU S Y. The effect of the storm surge on the coast and coastal engineering of Shandong in recent years[J]. Coastal Engineering, 2000, 19(2): 1-5.

[27] 蔡锋, 苏贤泽, 夏东兴. 热带气旋前进方向两侧海滩风暴效应差异研究——以海滩对0307号台风“伊布都”的响应为例[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 436-445. CAI F, SU X Z, XIA D X. Study on the difference between storm effects of beaches on two sides of the tropical cyclone track: taking the responses of beaches to No. 0307 Typhoon Imbudo as an example[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(4): 436-445.

[28] 高伟, 李萍, 高珊, 等. 台风“利奇马”对山东省海阳市海滩演化过程的影响[J]. 海洋学报, 2020, 42(11): 88-99. GAO W, LI P, GAO S, et al. Response process of the Haiyang Beach evolution to Typhoon Lekima in Shandong Province[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(11): 88-99.

[29] 董丽红, 梁书秀, 孙昭晨. 海滩养护理论与试验研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(5): 44-51. DONG L H, LIANG S X, SUN Z C. Advances in theoretical and experimental research on beach conservation[J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(5): 44-51.

[30] 庄振业, 印萍, 吴建政, 等. 鲁南沙质海岸的侵蚀量及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 15-21. ZHUANG Z Y, YIN P, WU J Z, et al. Coastal erosion and its influence on southern Shandong sandy coast[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 15-21.

[31] BITAN M, ZVIELY D. Sand beach nourishment: experience from the mediterranean coast of Israel[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(4): 273.

[32] 李广雪, 丁咚, 曹立华, 等. 山东半岛滨海沙滩现状与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2015. LI G X, DING D, CAO L H, et al. Present situation and evaluation of coastal beach in Shandong Peninsula[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.

[33] 中国海洋工程咨询协会. 海岸带生态减灾修复技术导则: 第7部分 砂质海岸: T/CAOE 21.7—2020[S]. 北京: 中国海洋工程咨询协会, 2020: 12. China Association of Oceanic Engineering. Technical guideline on coastal ecological rehabilitation for hazard mitigation: Part 7 Sandy Coast: T/CAOE 21.7—2020[S]. Beijing: China Association of Oceanic Engineering, 2020: 12.

[34] U.S. Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual[M]. Books Express Publishing, 2012.

[35] 蔡锋，等. 中国海滩养护技术手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 1-379. CAI F, et al. Chinese beach nourishment manual[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015: 1-379.

[36] 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. YANG Y X, ZHANG J B. Static equilibrium headland-bay coast theory and its application to coasts of the Yellow and Bohai Seas[J]. Coastal Engineering, 2007, 26(2): 38-46.

[37] 徐信辉, 庄振业, 曹立华, 等. 岬湾海滩静态平衡模式及其应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 1-11. XU X H, ZHUANG Z Y, CAO L H, et al. Beach static equilibrium model and its application[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(10): 1-11.

[38] 王志平, 钟益华, 蒋学炼, 等. 基于静态平衡岬湾海岸理论的海岸稳定性分析[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(8): 6-10. WANG Z P, ZHONG Y H, JIANG X L, et al. Analysis of coastal stability based on static equilibrium theory of headland-bay beaches[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(8): 6-10.

[39] 任旭光, 刘建涛, 刘会欣, 等. 北戴河浅水湾浴场养滩方案研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2017, 27(3): 17-21. REN X G, LIU J T, LIU H X, et al. A study on beach nourishment design in Shallow Bay Baths, Beidaihe[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2017, 27(3): 17-21.

Study on the Current Situation of Erosion and Protection Measures of Key Beaches in Northern Rizhao

SUN Jiaxuan[1,2], HAO Yi[3], FENG Yingming[3], CHONG Yanfei[3], LI Guangxue[1,2], LIU Minzuo[1,2]

(1. *School of Marine Geosciences*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
2. *Key Laboratory of Undersea Science and Exploration Technology*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, Qingdao 266061, China;
3. *The First Exploration Team of Shandong Coalfield Geological Bureau*, Qingdao 266427, China)

Abstract: According to the investigation and research in recent years, the northern part of the beach of Rizhao Beach National Forest Park is in a state of erosion, while the middle and southern part is in a state of siltation. Besides, Wanpingkou Beach is in an

erosive state. Based on the profile of the beachs before and after “Rumbia” and “Lekima”, it is considered that the typhoon is an important factor causing beach erosion and siltation. The sorting ability of the samples in the southern part of the beach of Rizhao Beach National Forest Park is better than that in the northern part, and the sorting ability of the samples in the shallow part is better than that in the deep part. The sorting ability of the samples in the middle and south of Wanpingkou Beach is better than that in the north, and the sorting ability of the samples in the middle is better than that in the shallow and deep, which provides the basis for sand throwing at the beach berm. As a result, a method of the combination of artificial beach nourishment and offshore submerged dike should be measured to protect and restore the northern part of the beach of Rizhao Beach National Forest Park and Wanpingkou Beach, with less damage in ecological environment and landscape.

Key words: northern part of Rizhao；beach；erosion；siltation；restoration and protection

Received: April 28, 2022