

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.007

养护海滩形态演化特征及时空差异性分析 ——以秦皇岛浪淘沙浴场为例

邱若峰^{1,2}, 杨燕雄^{1,2}, 庄振业³, 刘修锦^{1,2}

(1. 河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队, 秦皇岛 066001;

2. 河北省海洋地质资源调查中心, 秦皇岛 066001; 3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要: 海滩养护是修复受侵蚀海滩最快捷而有效的方法, 在国内外已得到了大量的工程应用。工程后, 海滩地貌形态为适应新的地形、水动力和沉积物条件而调整到新的平衡状态的过程中, 海滩剖面发生了先急后缓的形态变化。对秦皇岛浪淘沙浴场养滩工程后连续 36 个月的海滩形态监测数据进行分析, 结果表明海滩单宽体积平均增加约 $63.87 \text{ m}^3/\text{m}$, 岸线平均向海推进约 14 m, 海滩填沙保存量占填沙总量的 79.16%, 达到工程目标, 养滩效果良好。海滩形态演化过程中, 侵蚀强度呈明显的时空差异性: 养滩初期海滩侵蚀严重, 之后侵蚀强度呈减弱趋势。受波浪、水位、风向等因素的季节性变化影响, 平均海滩侵蚀量夏秋季明显高于冬春季。受东侧基岩岬头和填沙量差异的影响, 东段位于遮蔽段内, 且相对凹岸, 利于淤积, 而西侧位于切线段, 且相对凸岸, 侵蚀强烈。

关键词: 海滩养护; 形态演化; 侵蚀强度; 时空差异

中图分类号: P512.3

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)03-0067-08

海岸侵蚀是一种全球性的海岸带自然灾害, 我国海岸侵蚀自 20 世纪 50 年代以来日渐明显, 80 年代起国内学者开展了某些海岸的研究^[1]。2000 年以来, 砂质海岸侵蚀速率大多为 $1 \sim 3 \text{ m/a}$, 总体上呈现北强南弱的特点^[2]。因此, 海滩修复已成为海岸带综合整治的重要措施^[3]。

人工养滩是通过向侵蚀的海滩填沙养护, 在短时间内迅速展宽海滩, 促进海滩稳定^[4,5], 恢复和优化海滩自然环境。目前, 海滩养护已在欧美、日本等国家得到广泛应用^[6-8]。我国自 20 世纪 90 年代以来, 相继开展了一些养滩工程实践, 也做过相应研究, 取得了一些成绩, 但主要集中在工程方案设计模拟分析, 以及养滩前后沉积物和剖面形态变化等方面^[9-12], 对养滩后的海滩形态在时间上和空间上的差异性演化方面的研究相对较少。对养护后海滩长期监测, 能够及时得到海滩形态演化特征, 通过计算养护海滩剩余填沙量, 评价养护工程成败, 为后续工程提供参考。

本文以秦皇岛浪淘沙浴场为研究对象, 依据养滩工程后 36 个月的海滩剖面实测数据, 分析工程后

海滩形态演化特征, 探讨海滩侵蚀强度的时空差异性。

1 研究区概况和养滩工程简介

研究区位于秦皇岛市北戴河中海滩东端(图 1), 海滩长约 1.1 km, 以中细沙为主, 海滩东侧为基岩岬角, 是典型的岬湾型砂质海岸, 近岸海域局部有礁石外露^[13]。等水深线走向基本平行于岸线, 主要发育有水下浅滩、沙坝、沙波等地貌。

研究区附近河流主要为洋河、戴河、汤河等, 由于上游修建水库以及河口段修建橡胶坝, 年均径流量和输沙量均较少^[14]。该海区平均水位 8 月份最高, 1 月份最低, 年变幅为 0.56 m, 具有冬低夏高的特点。夏季气压低及径流、降水量大是导致水位偏高的主要原因; 冬季气压高(多偏北风)及径流、降水量小而导致水位偏低^[15]。波浪以风浪为主, 涌浪次之, 常浪向为 S 向, 强浪向为 SE 向。波浪破碎后形成沿岸流和离岸流, 沿岸流总体方向为自东向西, 波浪和海流作用引起泥沙输移和海滩演变。

研究区海域纬度较高, 水浅、盐度低, 每年都会出现不同程度的结冰现象, 一般于每年 11 月下旬至 12 月上旬开始结冰, 翌年 2 月下旬至 3 月上旬终冰^[16]。

由于各主要入海河流入海泥沙量减少, 加之近岸盗采海砂猖獗, 导致秦皇岛砂质海岸遭受不同程

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(11276709D); 基础勘查项目冀海涵(2015)98 号资助项目

作者简介: 邱若峰(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋地质环境调查与海滩养护研究工作, E-mail: qrofen1980@163.com

收稿日期: 2016-08-17; **改回日期:** 2016-09-27. 文凤英编辑

度的侵蚀,研究区内部分岸段海滩受侵蚀几乎消失,至养滩前期,平均宽度不足 10 m。2013 年 3—5 月,秦皇岛矿产水文工程地质大队在浪淘沙浴场实施海滩养护工程(图 2),补沙岸段长约 700 m,位于浴场的东半段,填沙约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,滩肩宽度平均增加约 40 m。研究区自西向东布设 5 条监测剖面(图 1),剖面基点均布设在海滩后滨建筑物台阶或公路边等固定地方,以保证剖面基点固定且不易被破坏,便于长期周期性监测。

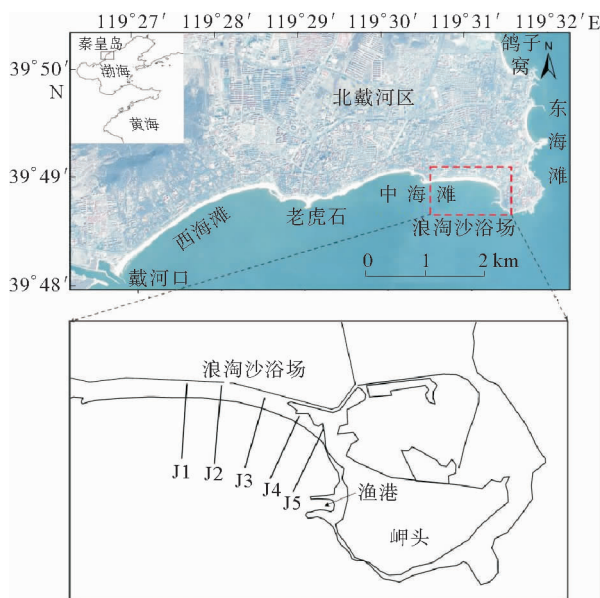


图 1 研究区及监测剖面位置图

Fig. 1 Location of study area and profiles

2 材料与方法

研究所采用的数据为:工程前(2013 年 3 月)和竣工后(2013 年 6 月、11 月,2014 年 5 月、11 月,2015 年 5 月、11 月,2016 年 5 月)共 8 期海滩剖面监测数据。应用 RMAP 软件计算出 5 条监测剖面

各期的 0 m 线、滩肩顶位置和高程 -1 m 以上区域单宽体积变化,然后根据相邻剖面平均单宽体积变化和相邻剖面之间宽度,二者相乘计算出工程区海滩高程在 -1 m 以上区域各期的填沙侵蚀量,分析工程后海滩演化特征,并对海滩侵蚀强度的时空差异性进行分析。

为了对岸滩侵蚀强度进行分级评价,选用岸线侵蚀速率和海滩宽度侵蚀模数两个因子进行定量分析^[17]。

(1)岸线后退速率,即单位时间内(一般为年)岸线的后退距离(一般为米),公式为:

$$S = D/T$$

其中, S 为岸线侵蚀速率, D 为岸线侵蚀距离, T 为时间。

(2)海滩宽度侵蚀模数,即单位时间内(一般为年)海滩蚀退宽度占整个海滩宽度的百分比,公式为:

$$W = (L_a - L_b)/L_a/T \times 100\%$$

其中, W 为海滩宽度侵蚀模数, L_a 为初期海滩宽度, L_b 为末期海滩宽度, T 为时间。

3 监测结果与分析

3.1 海滩剖面形态演化特征

对浴场的 5 条海滩剖面监测数据分析表明:相对于竣工初期,海滩形态变化剧烈,浴场西段的 J1 和 J2 两条剖面侵蚀严重,中部的 J3 剖面也呈现侵蚀状态,侵蚀强度相对较小,而浴场东段的 J4 和 J5 两条剖面有明显的淤积现象,但浴场海滩形态整体表现为侵蚀状态(表 1,图 3)。

竣工初期:海滩形态上向海拓展,最大单宽填沙量达 $141.5 \text{ m}^3/\text{m}$,平均单宽填沙量为 $71.9 \text{ m}^3/\text{m}$ 。0 m 线和滩肩顶向海推进较大,平均分别向海推进 28.5 和 19.0 m。



图 2 工程前后海滩对比照片

Fig. 2 Pictures of Langtaosha beach before and after a nourishment project

表 1 海滩养护后变化情况
Table.1 Changes of beach after nourishment projects

剖面	项目	竣工初期	6 个月	12 个月	18 个月	24 个月	30 个月	36 个月
J1	单宽变化/(m ³ /m)	90.0	-14.7	-2.2	-5.0	-5.7	-4.9	-7.3
	0m 线/m	38.6	-7.3	-14.1	14.3	-15.5	0.9	-6.5
	滩肩顶/m/	28.3	-4.0	0.7	-4.8	-0.4	-2.9	-2.1
	滩面坡度/(°)	3.4	3.9	10.8	3.3	7.4	5.6	7.7
J2	单宽变化/(m ³ /m)	141.5	-10.8	-10.9	4.8	-11.7	-2.2	-4.1
	0m 线/m	51.7	-10.1	-14.0	18.0	-18.9	14.0	-18.8
	滩肩顶/m	36.9	-2.7	-0.7	-4.9	-0.1	-2.8	-3.6
	滩面坡度/(°)	3.0	4.0	9.5	2.8	6.7	3.0	6.0
J3	单宽变化/(m ³ /m)	75.9	-10.3	0.7	-3.6	-2.8	-6.2	1.3
	0m 线/m	31.9	-10.0	-5.6	16.7	-18.2	12.9	-13.2
	滩肩顶/m	22.9	-3.7	0.1	-2.2	-0.4	-1.8	-0.6
	滩面坡度/(°)	4.0	5.5	8.4	3.1	7.7	3.4	6.6
J4	单宽变化/(m ³ /m)	31.4	-4.1	30.1	-7.3	16.6	-10.8	6.4
	0m 线/m	13.3	-0.5	4.8	4.2	-12.4	-1.7	1.0
	滩肩顶/m	5.1	-12.6	16.5	1.0	-3.0	-3.3	5.7
	滩面坡度/(°)	4.0	2.6	3.9	3.4	5.3	4.9	6.5
J5	单宽变化/(m ³ /m)	20.9	30.6	-2.6	-32.3	16.4	-1.9	10.1
	0m 线/m	7.2	3.8	-0.3	7.4	-12.7	1.1	5.1
	滩肩顶/m	1.6	0.2	5.8	-1.6	1.5	-3.4	5.6
	滩面坡度/(°)	4.0	3.5	4.5	3.1	6.1	4.7	4.8

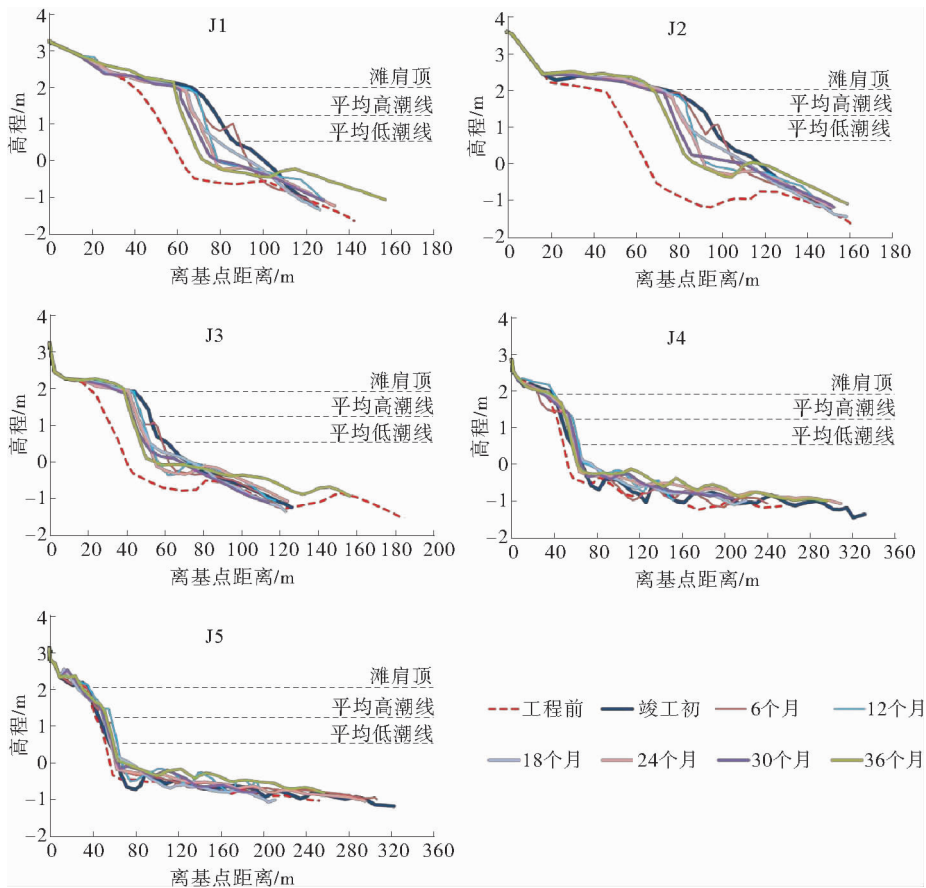


图 3 浴场养滩前后不同时期剖面变化

Fig.3 Variations of the beach profiles in different periods before and after nourishment

6 个月:海滩以侵蚀为主,仅 J5 剖面单宽呈淤积状态,约为 $30.6 \text{ m}^3/\text{m}$,0 m 线向海推进 3.8 m,滩肩顶基本不变;其余剖面平均单宽侵蚀量约 $10.0 \text{ m}^3/\text{m}$,0 m 线平均蚀退 7.0 m,滩肩顶平均蚀退 5.7 m,滩面平均坡度 3.9° 。填沙初期,海滩侵蚀最剧烈,填沙在动力作用下向相邻岸段输移,造成填砂区内沙量明显减少。

12 个月:仅 J3 和 J4 剖面单宽略有淤积,分别为 0.7 和 $30.1 \text{ m}^3/\text{m}$,其他剖面平均单宽侵蚀量为 $5.2 \text{ m}^3/\text{m}$ 。0 m 线仅 J4 剖面略向海淤进约 4.8 m,其他剖面平均后退约 8.5 m,西段滩肩顶侵淤幅度不超过 0.7 m,东段的 J4 和 J5 剖面则分别向海淤进了 16.5 和 5.8 m。滩肩顶平均向海淤进约 4.5 m,滩面坡度平均为 7.4° ,较 6 个月时变陡。

18 个月:仅 J2 剖面单宽略有淤积,为 $4.8 \text{ m}^3/\text{m}$;其余剖面平均单宽侵蚀量达 $12.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 。0 m 线均向海淤进,平均淤进达 12.1 m;滩肩顶除 J4 剖面外,均向陆后退,平均后退约 3.4 m,滩面坡度平均为 3.1° ,整体变缓。

24 个月:海滩东段 J4、J5 剖面处于单宽淤积状态,分别为 16.6 和 $16.4 \text{ m}^3/\text{m}$,西段的剖面处于侵蚀状态,平均单宽侵蚀量约 $6.7 \text{ m}^3/\text{m}$ 。整个浴场 0 m 线平均蚀退达 15.5 m,尤其以西段的 3 条剖面处最为严重,滩肩顶变化则相对较小,平均仅后退 0.5 m,滩面坡度平均为 6.6° ,坡度变陡。

30 个月:浴场海滩整体表现为侵蚀状态,平均单宽侵蚀量为 $5.2 \text{ m}^3/\text{m}$,J4 剖面单宽侵蚀量最大,为 $10.8 \text{ m}^3/\text{m}$;0 m 线整体向海淤进约 5.4 m;滩肩顶则表现为整体向岸后退,平均后退距离为 2.8 m,滩面坡度平均为 4.3° ,整体变缓。

36 个月:浴场海滩西段的 J1 剖面侵蚀最为强烈,到 J3 剖面由侵蚀转为淤积,东段的 J5 剖面淤积最大。0 m 线和滩肩顶西段的 J1—J3 剖面均表现为后退,平均后退距离分别为 12.8 和 2.1 m,东段的 J4—J5 剖面岸段分别平均向海淤进 3.1 和 5.7 m,滩面坡度平均为 6.3° ,整体变陡。

海滩养护后经过 36 个月的形态演化,相对于填沙初期,浴场呈西侵东淤的特征,J1—J3 剖面单宽侵蚀量分别为 39.8 、 34.9 和 $21.0 \text{ m}^3/\text{m}$,东段的 J4 和 J5 剖面则表现为淤积,单宽淤积量分别为 30.9 和 $20.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 。0 m 线和滩肩顶变化也均呈西侵东淤的特征,自西向东后退距离逐渐减少,并转为淤积,且东段淤积程度大。海滩整体表现为侵蚀状态,其中填沙初的前半年侵蚀量较大,之后侵蚀强度有所减弱。

3.2 填沙体积变化特征

自养滩结束后,海滩季节性侵蚀强度差异明显。前 6 个月,养滩后第一个夏秋季侵蚀掉约 8.52% 的沙量;6—12 个月期间,养滩后第一个冬春季仅侵蚀掉约 0.4% 的沙量;12—18 个月期间,养滩后第二个夏秋季侵蚀掉约 5.72% 的沙量;18—24 个月期间,养滩后第二个冬春季仅侵蚀掉约 2.5% 的沙量;24—30 个月期间,养滩后第三个夏秋季侵蚀掉约 5.59% 的沙量;30—36 个月期间,养滩后第三个冬春季由侵蚀转为淤积,共淤积 1.99% 的沙量。平均夏秋季侵蚀掉 6.64% 的沙量,而冬春季平均仅侵蚀掉约 0.3% 的沙量,二者相差二十余倍,呈现出明显的夏秋季侵蚀强、冬春季侵蚀弱的特点。经过 36 个月的自然演化,剩余沙量仍占总填沙量的 79.16%。

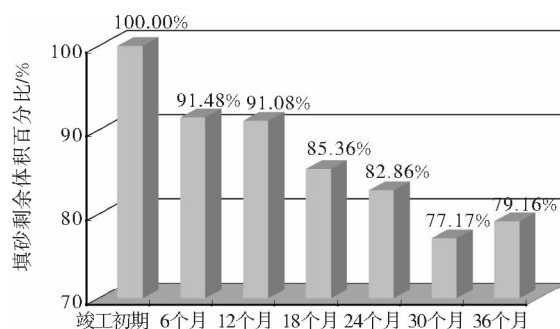


图 4 浴场养滩前后不同时期剩余填沙量百分比
Fig. 4 Volume of filling sand of different periods before and after nourishment

3.3 养滩后岸滩侵蚀强度分析

根据养滩后海滩宽度,分别计算各海滩剖面处岸线侵蚀速率和海滩宽度侵蚀模数两个因子(表 2)。

表 2 海滩侵蚀强度

Table 2 Intensity of beach erosion

剖面	岸线后退速率 $S/(\text{m}/\text{a})$	海滩宽度侵蚀模数 $W/\%$
J1	4.50	6.10
J2	4.90	5.72
J3	2.84	5.79
平均	4.08	5.87
J4	-1.42	-3.28
J5	-2.69	-6.55
平均	-2.06	-4.91

注:“—”表示淤积

由表 2 可以看出 J1—J3 剖面段岸线呈侵蚀现象,平均侵蚀速率约为 $4.08 \text{ m}/\text{a}$,平均侵蚀模数达

5.87%,参照丰爱平^[17]划分的海岸侵蚀强度级别(表 3),J1—J2 岸段侵蚀级别达到严重侵蚀,J3 附近岸段侵蚀强度级别为侵蚀;J4—J5 岸段呈现向海淤积状态,平均后退速率约 -2.06 m/a ,平均侵蚀模数 -4.91% 。这是由于该岸段离基岩岬头较近,位于其遮蔽区内,受波浪影响较小,而波浪可以直接作用于 J1—J3 剖面岸段,致使这几条剖面所处岸段侵蚀相对较强。

表 3 海岸侵蚀强度分级方案

Table 3 Classification scheme of beach erosion intensity

强度级别	后退速率 $S/(\text{m/a})$	侵蚀宽度模数 $W/\%$
淤积	<0	<0
微侵蚀	$0\sim1$	$0\sim2$
侵蚀	$1\sim2$	$2\sim5$
强侵蚀	$2\sim3$	$5\sim10$
严重侵蚀	>3	>10

4 侵蚀强度时空差异性分析

根据海滩剖面形态演化、岸线及填沙体积变化和侵蚀强度分析可以看出,随着养滩后时间的推移,在海滩地形与水动力条件相互作用下,由于波浪、水位、风向以及不同岸段周边地貌环境的差异,海滩侵蚀强度呈明显的时间性差异和空间性差异^[18]。

4.1 侵蚀强度时间性差异

海滩侵蚀时间性差异主要体现在两方面,一方面是养滩后随时间的推移而产生的侵蚀强度差异,另一方面表现为剖面演化的季节性侵蚀强度差异。

4.1.1 养滩后不同时期侵蚀强度差异

养滩后,海滩宽度得以大幅度展宽,使得原滩地形地貌特征发生较大变化,新填沙相对松散,在水动力作用下易被冲蚀,引起海水悬沙量增高,携带到岸外发生沉积,增高近岸海底地形,引起了波浪提前破碎,改变沿岸流场,削减水动力对岸滩的作用,而且新滩经过一段时期的波浪作用和沉降、压实,原松散的沉积物逐渐密实,之后侵蚀程度会有所减弱^[19,20]。

填沙后初期,新滩为了适应水动力条件,海滩平面和剖面形态都发生了较大的调整,泥沙以横向运移为主,海滩形态短时期内发生明显改变^[9],这也导致了养滩工程竣工后 6 个月内侵蚀掉 8.54% 的填沙量,侵蚀程度严重,这一时期也被称为养滩的重塑期。之后,海滩进入养滩后的调整期,海滩形态、水

动力特征逐步相互适应,侵蚀程度随之逐渐减弱,养滩后 6—30 个月,持续两年的时间海滩共侵蚀掉了 14.31% 的填沙量,月均侵蚀量小于工程后 6 个月的月均侵蚀量,侵蚀强度较前半年明显减弱,海滩形态逐渐向平衡状态演变。此时海滩剩余 77.17% 的填沙,调整期之后,海滩进入了趋稳期。填沙 30—36 个月期间,海滩淤积了 1.99% 的沙量,岸滩进入稳定状态,侵蚀强度将会进一步减小,甚至出现淤积。

4.1.2 侵蚀强度季节性差异

造成海滩侵蚀强度季节性差异的主要原因是波浪的季节性变化。夏秋季波浪以偏南向为主,波浪直接作用于研究区内大部分岸滩,仅东段的 J4 和 J5 两条剖面受到基岩岬头和小渔港防波堤的遮蔽而侵蚀较弱,西段的 J1—J3 岸段直接受到波浪冲刷而侵蚀严重,岸滩整体侵蚀也相对较强;而冬春季,虽然风浪较大,但由于这一季节波浪以偏东北向为主,岸滩位于基岩岬头的遮蔽区内,波浪绕过岬头后发生折射和绕射,波能受到削减,因而岸滩受波浪影响较小。

影响海滩侵蚀强度季节性差异的另一原因是水位季节性的变化,这能够影响波浪对滩面扰动的范围^[21-23],改变中立带位置,从而使剖面形态发生变化^[24]。北戴河地区夏季水位高,波浪作用于滩面范围较大,中立带位置偏上,导致中立带以下的大量沉积物向海输移,部分物质在滩面下部发生堆积引起滩面坡度变缓;而冬季水位较低,波浪作用于滩面的面积也较夏季小,中立带位置也较夏季偏下,中立带以上沉积物向岸输移,但向上输移高度未达到夏季剖面滩肩的高度,因而在夏季滩面部位逐渐发育形成冬季低水位期的较低的滩肩,形成双滩肩模式的剖面(图 5),中立带以下沉积物向海输移,引起滩面下部发生侵蚀后退,造成滩面坡度变陡,但由于中立带位置相较于夏季时的偏下,因此,海滩侵蚀面积较夏季减少,产生了海滩夏季侵蚀量大于冬季侵蚀量这一明显差异。

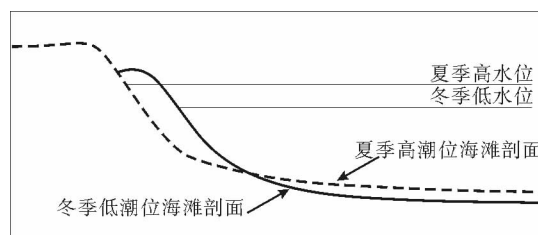


图 5 不同潮位高度下的海滩剖面形态示意图

Fig. 5 Profiles of different tide levels

风对海滩侵蚀强度的影响,主要通过风引起的风海流产生作用。夏季以偏南风(向岸风)为主,冬季以偏北风(离岸风)为主,向岸风引起表层流向岸运动,导致底层水体向海运动;离岸风产生的表层水体离岸运动,导致底层水体向岸运动^[25]。底层水体的向岸和离岸运动是引起泥沙横向搬运的一个因素,因此夏季的向岸风导致泥沙向海输移,增强了海岸侵蚀,而冬季的离岸风导致了泥沙的向岸输移,在一定程度上对岸滩沉积物进行了补充^[26]。这也是导致海滩侵蚀强度季节性差异的又一因素。

研究区位于辽东湾西岸,纬度相对较高,冬季近岸海域往往有浮冰存在,海冰影响潮位的升降和潮流的运动,减小潮差和流速,同样也减小波高,阻碍波浪的传播,削弱了波浪对海滩的作用,从而降低了离岸流和沿岸流的携沙能力^[9],岸滩侵蚀相对较弱。因而导致了海滩侵蚀夏秋季强于冬春季。

4.2 侵蚀强度空间性差异

不同岸段因海洋动力环境、填沙后形态变化等方面的不同,必将产生侵蚀强度的差异。

4.2.1 不同岬湾岸段侵蚀强度差异

秦皇岛浪淘沙浴场东段有天然的基岩岬头,属于典型的岬湾海岸。为保护岬湾内渔港,渔港两侧各修建了东西向的长约 100 m 防波堤(图 1)。岬湾海岸根据形态成因分为遮蔽段和切线段^[27],遮蔽段位于岬角背后的遮蔽区,是波浪的波影区;切线段为靠近海岸下游岬角的直线段,与波峰线平行^[28,29](图 6)。

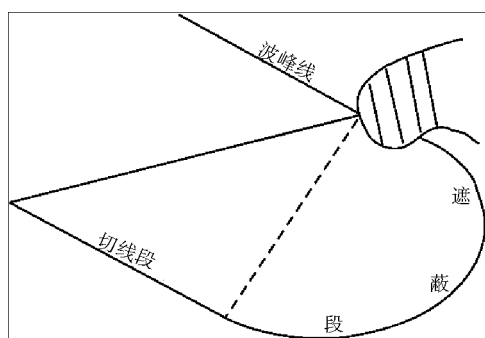


图 6 岬间海湾结构

Fig. 6 Structure of headland-bay beach

4.2.2 填沙量引起侵蚀强度差异性分析

原滩在长期的动力作用下,岸线形态已基本稳定,人工补沙后,由于不同岸段补沙量的不同,滩肩向海增宽的宽度也不尽相同,西侧的 J1—J3 剖面向

海推进较大,东侧的 J4 和 J5 剖面向海推进较小,这就使得西侧岸线向海略有凸出^[9],形成砂质的岬角,岬角处波能集中增大,因而导致该岸段发生侵蚀,侵蚀掉的沉积物在动力作用下在凹岸(J4-J5 岸段)处发生沉积。

5 结论

(1) 海滩养护后,相对于养护前海滩明显展宽,经过 36 个月的形态演化,海滩各剖面单宽体积平均增加约 $63.87 \text{ m}^3/\text{m}$,滩肩平均向海展宽约 14.06 m,0 m 线平均向海推进 13.44 m,海滩最终保存了 79.16% 的填沙量,养护效果良好。

(2) 海滩侵蚀明显呈现出时间性差异。养护初期,海滩明显展宽,在水动力的作用下进行调整,侵蚀较强,之后海滩侵蚀程度相对减弱,工程后 6 个月的侵蚀量甚至超过之后 18 个月的侵蚀总量;另外受到波浪方向、水位高低、风向及海冰等因素季节性变化的共同影响,夏秋季岸滩侵蚀强度远大于冬春季。

(3) 海滩侵蚀强度空间差异性明显。东段受到岬角的保护,且补沙量较少而形成相对的凹岸段,有利于沉积物堆积,而西段位于岬角保护区外侧的切线段,且填沙量较大而形成相对凸岸,呈现出侵蚀状态。整体表现为自西向东侵蚀逐渐减弱,并转变为淤积。

参考文献 (References)

- [1] 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 Zhenye, YIN Ping, WU Jianzheng, et al. Coastal erosion and its influence on southern Shandong sandy coast [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(3): 15-21.]
- [2] 左其华, 窦希萍, 段子冰. 我国海岸工程技术展望[J]. 海洋工程, 2015, 33(1): 1-13. [ZUO Qihua, DOU Xiping, DU-AN Zibing. Prospects of coastal engineering technology in China[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(1): 1-13.]
- [3] 庄振业, 王永红, 包敏, 等. 海滩养护过程和工程技术[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 1019-1024. [ZHUANG Zhenye, WANG Yonghong, BAO Min, et al. Beach nourishment process and engineering technology[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 1019-1024.]
- [4] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 133-139. [ZHUANG Zhenye, CAO Lihua, LI Bing, et al. An overview of beach nourishment in China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(3): 133-139.]

- [5] 吴建, 拾兵. 近岸补沙养护海滩研究综述[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 108-112. [WU Jian, SHI Bing. A review of the shoreface nourishment for beach protection[J]. Marine Sciences, 2011, 35(8): 108-112.]
- [6] Climate Change Information Resources-New York Metropolitan Region (CCIR-NYC). What are the projected costs of climate change in the region's coastal communities and coastal environments? [Z]. CCIR-NYC, 2005: 1-2.
- [7] Valverde H R, Trembanis A C, Pilkey O H. Summary of beach nourishment episodes on the U. S. East Coast Barrier Islands[J]. Journal of Coastal Research, 1999, 15(4): 1100-1118.
- [8] 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.
- [9] 刘修锦, 王永红, 杨燕雄, 等. 海滩养护后剖面变化过程研究——以北戴河西海滩和中海滩为例[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 53-61. [LIU Xiujin, WANG Yonghong, YANG Yanxiong, et al. Changes in beach profile morphology after nourishment—a case from western and middle Beidaihe beaches[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 53-61.]
- [10] 刘修锦, 庄振业, 谢亚琼, 等. 秦皇岛金梦湾海滩侵蚀和海滩养护[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 71-79. [LIU Xiujin, ZHAUNG Zhenye, XIE Yaqiong, et al. Beach erosion and beach nourishment of Jinmeng Bay Beach in Qinhuangdao [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(3): 71-79.]
- [11] 雷刚, 刘根, 蔡锋. 厦门岛会展中心海滩养护及其对我国海岸防护的启示[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(3): 305-315. [LEI Gang, LIU Gen, CAI Feng. Enlightenment to China's coastal protection from the coast beach nourishment at Huizhan Zhongxin of Xiamen Island[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(3): 305-315.]
- [12] 匡翠萍, 单云驰, 顾杰, 等. 海坛湾龙凤头海滩养护工程方案[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(5): 714-721. [KUANG Cuiping, SHAN Yunchi, GU Jie, et al. Beach nourishment in Longfengtou Beach of Haitan Bay[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(5): 714-721.]
- [13] 王中起, 韩志远, 严冰. 秦皇岛海域水文泥沙特征分析[J]. 水道港口, 2010, 31(4): 247-252. [WANG Zhongqi, HAN Zhiyuan, YAN Bing. Hydrographic and sediment characteristics in Qinhuangdao sea area[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(4): 247-252.]
- [14] 尉建功, 冯秀丽, 林霖, 等. 秦皇岛附近海域表层沉积物粒度分布特征及运移趋势分析[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(7): 66-71. [WEI Jiagong, FENG Xiuli, LIN Lin, et al. Grain-size characteristic of the sediments and transport patterns in Qinhuangdao offshore area[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(7): 66-71.]
- [15] 张彦龙. 秦皇岛港附近海域潮汐、波浪和海流特征[J]. 海洋通报, 1997, 16(3): 21-27. [ZHANG Yanlong. Characteristics of tides, waters and currents in the sea area near Qinhuangdao Harbour[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(3): 21-27.]
- [16] 郑冬梅, 王志斌, 张书颖, 等. 渤海海冰的年际和年代际变化特征与机理[J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 12-20. [ZHENG Dongmei, WANG Zhibin, ZHANG Shuying, et al. Interannual and interdecadal variations of the sea ice in Bohai Sea and its mechanisms[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(6): 12-20.]
- [17] 丰爱平, 夏东兴. 海岸侵蚀灾情分级[J]. 海岸工程, 2003, 22(2): 60-66. [FENG Aiping, XIA Dongxing. Grading of coastal erosion disaster situation[J]. Coastal Engineering, 2003, 22(2): 60-66.]
- [18] 陈子桑. 海滩剖面时空变化过程分析[J]. 海洋通报, 2000, 19(2): 42-48. [CHEN Zishen. Analysis on spatial and temporal processes of Beach profile variations[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(2): 42-48.]
- [19] Kana T W, Mohan R K. Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project[J]. Coastal Engineering, 1998, 33(2-3): 117-136.
- [20] Dean R G. Beach Nourishment: Theory and Practice[M]. New Jersey: World Scientific, 2002.
- [21] 王颖, 吴小根. 海平面上升与海滩侵蚀[J]. 地理学报, 1995, 50(2): 118-127. [WANG Ying, WU Xiaogen. Sea level rise and beach response[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(2): 118-127.]
- [22] 蒋昌波, 伍志元, 陈杰, 等. 波浪动力因素变化对沙质岸滩演变的影响[J]. 海洋学报, 2015, 37(3): 106-113. [JIANG Changbo, WU Zhiyuan, CHEN Jie, et al. Effects of wave dynamic factors on the evolution of sandy beach[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(3): 106-113.]
- [23] 陈子桑, 李志龙, 陈建耀, 等. 常波况下前滨剖面地形动力过程分析[J]. 海洋通报, 2007, 26(3): 12-18. [CHEN Zishen, LI Zhilong, CHEN Jianyao, et al. Analysis on morphodynamic processes of foreshore profile under normal wave conditions[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(3): 12-18.]
- [24] 陈子桑. 海滩剖面形态与地形动态研究的进展[J]. 海洋通报, 1997, 16(1): 86-91. [CHEN Zishen. Progress in studies on the shapes and dynamics of beach profiles[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(1): 86-91.]
- [25] 陈子桑. 海南岛新海湾海滩地貌状态与海岸泥沙纵向运动特征[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(5): 467-476. [CHEN Zishen. Geomorphological types of beach and the characteristics of sediments longshore movement in arc-shaped bay of Xinhai Bay, Hainan Island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(5): 467-476.]
- [26] Thomas T, Phillips M R, Williams A T, et al. Medium timescale beach rotation; gale climate and offshore island influences[J]. Geomorphology, 2011, 135(1-2): 97-107.
- [27] Silvester R. Coastal Engineering[M]. Amsterdam: Elsevier, 1974: 71-83.
- [28] 李志龙, 陈子桑. 岬间海湾平面平衡形态研究进展[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 155-160. [LI Zhilong, CHEN Zishen. Studies on the equilibrium shape of headland-bay[J]. The O-

cean Engineering, 2006, 24(1): 155-160.]

[29] 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

Yanxiong, ZHANG Jiabo. 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.]

BEACH EVOLUTION AND SPACE-TIME DISCREPANCY OF EROSION INTENSITY AFTER NOURISHMENT ——Taking Langtaosha beach of Qinhuangdao as an example

QIU Ruofeng^{1,2}, YANG Yanxiong^{1,2}, ZHUANG Zhenye³, LIU Xiujin^{1,2}

(1. Qinhuangdao Mineral Resource and Hydrogeological Brigade, Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066001;

2. Hebei Center of Marine Geological Resources Survey, Qinhuangdao 066001;

3. College of marine geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Beach nourishment is a convenient and effective way to fight with coastal erosion, and there has been a large number of projects at home and abroad for nourishment. After every nourishment, the beach profiles will change obviously after or within three years to approach a hydrodynamic balance. In this case, we studied the natural evolution of the Langtaosha beach for two years of time after a nourishment. In the two years, the beach volume increased about $63.87\text{m}^3/\text{m}$, the shoreline moved seawards for about 14m, and the ratio of sand preservation of the beach reached 79.16%. The project is respected as a great success. In the process of natural evolution, the erosion intensity is significantly changed in different seasons and from place to place. Immediately after the beach nourishment, the beach erosion was very strong. It became weaker as time went on. As a result of the seasonal variation in wave direction, sea level and wind direction, the erosion intensity in summer is stronger than that in winter. Because of the headland on the eastern side of the beach and difference in sediment nourishment, the eastern part of beach, which is located at a relative concave bank and shielded from wave action, is more inclined to deposition. But the western section, which is located at a relative convex bank, is eroded seriously.

Key words: beach nourishment; morphological evolution; erosion intensity; space-time discrepancy