

王海燕, 庄振业, 曹立华, 等. 荷兰诺德维克水下抛沙修复海滩及其意义[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(11): 66-73.

荷兰诺德维克水下抛沙修复 海滩及其意义

王海燕¹, 庄振业¹, 曹立华¹, 邱若峰², 张永华³

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 河北省海洋地质资源调查中心, 秦皇岛 066000;

3 国家海洋环境检测中心, 大连 116023)

摘要:水下抛沙养滩可以通过消减波能和持续向海滩供沙, 以抵御海岸侵蚀, 保持海滩稳定。荷兰诺德维克(Noordwijk)地区以发育水下双坝地形为特征, 为了维护海滩和海岸的稳定, 自 1998 年开始, 共实施了 3 次水下养滩(1998、2002 和 2006 年), 抛沙位置都选在外沙坝的向海侧, 接近当地闭合深度。养滩减缓了沙坝向海迁移的速率, 内、外沙坝均出现了向岸迁移的趋势并基本保持稳定, 对海岸线位置变化具有积极影响。我国目前的海滩养护工程多为向陆上滩面抛沙养滩, 这种方法较昂贵、破坏性大, 效果有时不佳, 而水下抛沙养滩经济实惠、对环境影响小且灵活, 因此, 应该充分借鉴水下抛沙养滩的成功经验。基于诺德维克地区数十年的 Argus 视频图像和水深调查对养滩效果进行了研究和分析, 总结了水下养滩的意义, 以丰富和推动我国养滩业的发展。

关键词:水下养滩; 水下双坝; Argus 视频图像; 海滩稳定

中图分类号:TV148; P748

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.11010

0 引言

早在 20 世纪 70 年代, 我国已开展了初级抛沙养滩工作, 我国砂岸以岬间短滩为主, 人们养滩意识普遍薄弱, 与发达国家相比养滩规模太小, 经济投入小^[1]。经过多年发展, 养滩类型逐渐齐全, 实施以“软”工程为主, “软硬”工程兼顾的设计理念。“软”工程是通过抛沙来保护海滩, 为旅游业开发维护特定海滩宽度, 并保护陆上区域免受海水侵蚀。海滩养护的范围从海滩的滩面到水下滨面区域。近十余年, 发现向滩面抛沙养滩工程对

海岸结构和周围环境有所破坏, 因此, 水下养滩受到了越来越多的关注, 成为研究热点。水下养滩即向水下(低潮线向海)沙坝或凹槽上抛填大量沙, 以消减波能和向岸供沙, 从而增宽海滩。水下补沙的形式包括凹槽补沙和沙坝补沙两种。

水下养滩的方法已在荷兰^[2]、比利时、德国、美国 and 我国秦皇岛^[3]等地区使用过。荷兰在 1990 年通过 NOURTEC 项目引入了水下养滩^[4], 每年抛沙约 8 Mm³^[5], 沿岸防护政策非常成功。多年来, 荷兰海岸的年平均抛沙量已经从 1952—1990 年的 40 万 m³/a 增加到 1991—2000 年的 250 万 m³/a, 到 2001 年增长到约 500 万 m³/a, 每 3~5 年在侵蚀点进行海滩养护, 抛沙量为 200~600 m³/m。如今, 荷兰海岸拥有充足的沉积物量, 这已经使得海岸线和沙坝的底部缓慢向海迁移约 0.5~1 m/a^[6]。为了确定沙坝的现状和发展趋势, 自 1963 年以来荷兰政府每年都对

收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 自然资源部海域管理技术重点实验室开放研究基金(201706)

作者简介: 王海燕(1994—), 女, 在读硕士, 主要从事海底探测方面的研究工作. E-mail: wanghaiyhard@163.com

海岸水深进行监测,并将监测数据载入荷兰公共工程部(the Dutch Department of Public Works) JARKUS 数据库^[7]。本文拟通过收集 Argus 视频图像数据^[8-9]和水深调查,分析荷兰水下养滩对沙坝和海岸线的影响和意义,介绍诺德维克地区水下沙坝抛沙养滩的过程、监测和养滩效果,结合区域水文泥沙运动和其他文献资料分析双坝水下养滩机理,以丰富和推动我国养滩业的发展。

1 区域概况

1.1 地貌特征

诺德维克是荷兰中部的一个城镇(图1)。该地区海岸平直长约120 km,海岸整体坡度约为1:150,面向半封闭的北海,发育两个潮间带海滩(坡度约1:30)^[8-9]。海滩沉积物粒径从海滩(中值粒径为0.25 mm)到离岸约600 m处(水深为4~5 m,中值粒径0.15 mm)呈现出从海岸向海变细的趋势,而离岸800 m处(中值粒径为0.3 mm)沉积物粒径逐渐变粗,最后再向海出现变细的趋势^[7]。在海滩南部(约30 km)沉积物粒径位0.125~0.25 mm,而在北部,沉积物粒径为0.25~0.5 mm^[10]。

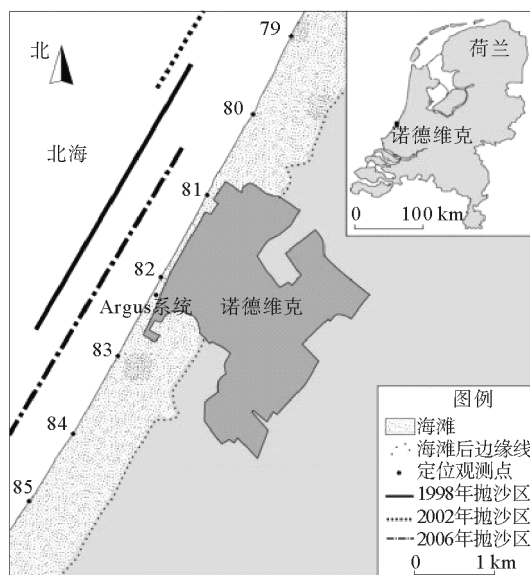


图1 诺德维克研究区和水下养滩抛沙区域(据文献[2])

Fig.1 Location of Noordwijk and shoreface nourishment areas (from reference [2])

诺德维克海域发育近岸潮下带两沙坝地形(图2)^[7]。低潮线以外发育内沙坝,坝顶水深1.1 m,距岸约300 m,外沙坝坝顶水深2.6 m,距岸约500 m,坝间凹槽水深为5.0 m。内沙坝高出凹槽约4.9 m,外沙坝高出凹槽约3.4 m。内沙坝宽约100 m,向海迁移率约为60 m/a,外沙坝宽约150 m,向海迁移率约为100 m/a。潮下带沙坝的寿命较长,可长达数年,其形成过程可分为3个阶段:①沙坝在近岸处形成;②在波浪作用下向海净迁移;③在离岸约600 m处衰退消亡,其衰退消亡触发了新沙坝的形成,该循环过程的周期约为4 a^[8]。但在同一时期,一个沙坝的不同部分也许会偶然地处于不同阶段,这导致了沙坝的破碎,一部分衰退消亡,其余部分开始附着于向岸的沙坝上。

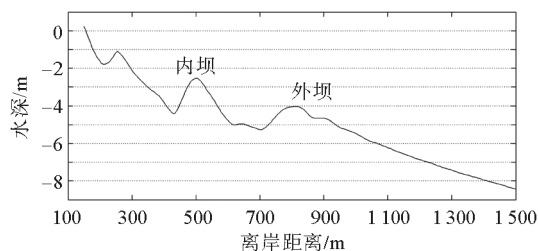


图2 2000年6月9日沙坝水深剖面图(据文献[7])

Fig.2 A cross-shore profile of the bathymetric survey performed on 9 June 2000 (from reference [7])

1.2 浪潮和泥沙运动

诺德维克海域的波浪主要是倾斜入射,为SW向和NW向^[8]。平均有效波高为1 m,周期为6 s。月平均波高呈季节性变化,秋季和冬季(12—3月,平均有效波高为1.2~1.3 m)的数值大于春季和夏季(4—9月,平均有效波高为0.8~0.9 m)。风暴浪(>15 m)通常从SW向NW,波高可达5 m左右,周期为8~12 s。本区属于半日潮区,小潮潮差约为1.4 m,潮流速为0.8 m/s,大潮潮差约为1.8 m,潮流速为0.6 m/s。风暴过后的诺德维克岸外,泥沙浓度最高达1 kg/m³^[11]。

1.3 海岸侵蚀

研究区内海岸线侵蚀由来已久。定位研究表明,在过去的140 a里,荷兰中部海岸侵蚀不断增

加^[10]。在 1600—1800 年期间,由于南部和北部潮流通道附近潮流的侵蚀,荷兰海岸线以 3~5 m/a 的速度向后蚀退。从 1800 年开始,通过修建防波堤和丁坝,海岸线的侵蚀速率减少到约 0.5~1.5 m/a^[12]。荷兰中部海岸线以 0.2 m/a 的速度向前淤进,淤积量为 0.45 Mm³/a。此外,南部和北部海岸线的侵蚀速度分别约为 0.3 m/a 和 0.9 m/a,侵蚀量分别为 0.25 Mm³/a 和 0.2 Mm³/a^[13]。

荷兰大部分海岸剖面的坡度正在变陡,海平面的不断上升使泥沙进入潮流通道造成淤闭,加上近岸处沟槽的迁移使泥沙在近岸沟槽处淤积,增高了沙坝,造成海岸线的不断侵蚀。根据 dGPS 调查及其他项目调查的数据,1885 年以前,诺德维克地区海岸线整体侵蚀后退约 45 m(与 1880 年相比),侵蚀速度约 9 m/a;1885—1910 年期间,海岸线整体向海淤进约 65 m,淤进速度约为 2.6 m/a;1910—1997 年期间,海岸线整体为稳定—微侵蚀状态;1998—2006 年期间,首次实施了水下养滩后,海岸线整体为稳定—微淤进状态。

2 数据和方法

2.1 视频图像

Argus 系统即近岸视频观测技术,是获得长时间、大范围海岸带的波浪、水流、岸线、地貌特征动力环境等要素的有效手段。该系统是一个基于视频图像的海岸带信息提取与分析系统,可以对海滩及近海海域进行实时在线监测。该系统主要由图像采集系统和数据存储/传输系统组成。图像采集系统一般由 4-6 个实地摄像机组成,可对海岸带进行 180 度全方位观测。在时间尺度上,ARGUS 系统可以实施从不到一秒到连续数年的观测,甚至更长^[14]。Van Enckevort 等人^[8]收集并分析了诺德维克地区约 6 a(1998—2006 年)每天的 Argus 视频图像(图 3)。自 1998 年 9 月中旬起,在海平面以上约 60 m 的酒店房顶安装了自动化视频站,获取抛沙区域 Argus 视频图像,该系统在白天自动收集以 10 min 为时间间隔的曝光视频图像,总计,数据集包括 519 个内沙坝,

417 个外沙坝和 82 个养滩点的观测^[7]。Grinten R M 和 Ruessink B G^[15]收集了诺德维克地区约 2006—2011 年里每天的 Argus 视频图像。

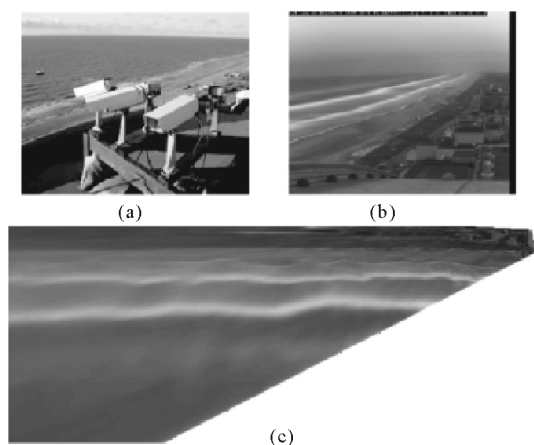


图 3 荷兰诺德维克地区的 Argus 系统(a),拍摄图片(b),校正图片(c)(据文献[8,14])

Fig.3 (a) Argus video system, (b) an oblique image and (c) a rectified image of Noordwijk, the Netherlands (from references [8,14])

2.2 现场调查

海岸线数据是通过 4 个来源收集的:①Verhagen^[16]采集分析了自 1850 年以来以 1 km 分辨率采样的荷兰海岸线位置变化,Ruessink 和 Jeuken^[17]在 1850—1998 年期间以 1km 分辨率采样的年际低水位数据集来量化诺德维克地区每十年和每百年的海岸线变化;②Wijnberg 和 Terwindt^[10]利用 JARKUS 项目的年际调查,分析了 1964—2003 年期间的每年和每 10 年的海岸线变化。在 JARKUS 数据集中横向测量剖面的间距为 250 m^[17];③Ojeda E 等人^[7]在养滩作业完成后(2000—2004)进行了 9 次水深调查以监测海岸对养滩的响应;④自 2001 年 10 月—2004 年 11 月,每月从抛沙区向岸侧 1.5 km 的区域中,利用 dGPS 调查提取海岸线变化数据^[18]。

3 抛沙养滩过程

自 1998 年至今,诺德维克地区共进行了 3 次水下抛沙养滩作业。首次养护作业在 1998 年 2—3 月完成^[19],通过拖曳漏斗式吸沙船将新沙抛

置在外沙坝向海侧(图 1,剖面 80.50~83.50),离岸约 1 000 m,水深为 5~8 m,接近当地闭合深度。抛沙量约为 1.7 Mm^3 ,顺岸长约 3 km,抛沙区宽约 250 m,抛沙厚度约为 2.28 m,剖面单宽沙量 $570 \text{ m}^3/\text{m}$ 。新沙比原滩沉积物粗,前者粒径约 0.35~0.4 mm,几乎是后者(0.2 mm)的 2 倍。

抛沙区在波浪作用下逐渐向岸迁移并消散,需要重复进行,因此,2002 年秋在北部地区再次抛沙(图 1,剖面 73.00~80.00)^[19]。抛沙区离岸约 1 100 m,水深 6~10 m。沿 7 km 长的海岸抛了约 3.0 Mm^3 的沙,剖面单宽沙量为 $430 \text{ m}^3/\text{m}$ 。新沙粒径(0.25~0.35 mm)仍比原滩沉积物粗。此次作业抛沙量最大,抛沙区离岸最远且范围最大。

2006 年夏在中南部地区进行了第 3 次抛沙^[15],此次抛沙是在 1998 年抛沙的基础上进行的补充。抛沙位置仍选在外沙坝向海侧(图 1,剖面 81.50~89.00),离岸约 750 m,水深约为 4~7 m。抛沙量为 1.2 Mm^3 ,顺岸长约 7.5 km,剖面单宽沙量为 $160 \text{ m}^3/\text{m}$ 。

总体上,1998—2006 年诺德维克地区共抛沙 5.9 Mm^3 ,修复海滩长达数十千米。抛沙位置均在外沙坝向海侧。

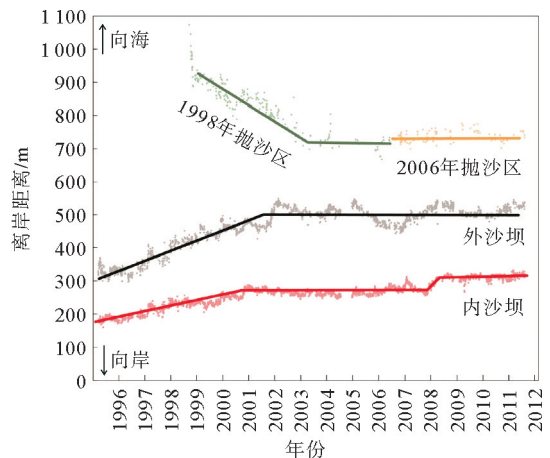
4 结果

4.1 水下沙坝的响应

在图 4 中可以看出,抛沙前沙坝整体呈向海迁移趋势。1995—1997 年期间(实施养滩之前),外沙坝向海迁移了约 200 m,即 66.7 m/a ,内沙坝向海迁移了约 100 m,即 33.3 m/a 。抛沙后,1998—2001 年期间,由于抛沙量太大,新沙向海自然扩散,因此,沙坝整体表现为向海迁移,外沙坝迁移了约 100 m,即 33.33 m/a ,内沙坝迁移了约 60 m,即 20 m/a 。与抛沙前相比,向海迁移速率降低了。2001—2007 年期间,沙坝整体呈向岸迁移,外沙坝迁移了约 110 m,即 18.3 m/a ,内沙坝迁移了约 50 m,即 8.3 m/a 。2002 年实施第 2 次水下养滩后,内、外沙坝都发生了向岸迁移,2006—2007 年期间(实施第 3 次水下养滩后),外

沙坝向岸迁移了约 50 m,内沙坝基本保持稳定,迁移幅度不超过 10 m,一直到 2008 年都没有恢复抛沙前的向海迁移的趋势。

首次实施水下养滩(1998 年)后 1 年,抛沙区内形成一个新沙坝,其坝顶水深约为 4 m^[6]。新沙坝略微向岸倾斜,其北端更靠近海岸。新坝是由于抛沙量很大且新沙粒径约为原滩沙的两倍,在风暴浪作用下,粗砂向岸迁移进而沉积形成。在 1998—2004 年期间,抛沙区向岸迁移了约 300 m,即 50 m/a 。它的向岸迁移并逐渐消退突出了预期的给沙效果。值得注意的是,新沙坝开始衰退消失的位置与外沙坝停止向海迁移并衰退的位置是一致的^[8,20]。在 2003—2004 年期间,新沙坝衰退消失,内沙坝向岸迁移并保持稳定,外沙坝在迁移方向上略有波动但整体表现为向岸迁移。



绿色为 1998 年养滩数据;黄色为 2006 年养滩数据;

黑色为外沙坝数据;红色为内沙坝数据

图 4 1996—2012 年的抛沙区、内沙坝和外沙坝的位置变化图(据文献[10])

Fig.4 Alongshore-averaged cross-shore location for the nourishment and for the inner and outer bars in the central section during 1996—2012 (form reference [10])

4.2 海滩沙量变化

Bougdanou M^[19] 基于包含 JARKUS 监测项目数据(测量范围不覆盖抛沙区)、养滩监测项目数据和 Argus 视频图像的数据集对诺德维克地区的水下养滩效果进行了分析。分析表明,诺德维克地区的水下养滩使该地区的沉积物体积增加,泥沙向岸输运量增加。1999 年即抛沙后 1

年,其效果是显著的(图5)。即使抛沙区完全位于测量区之外,但其对应的海滩剖面沙量均有增加,而抛沙区以南和以北的剖面沙量减少。海滩剖面的平均淤积量为 $100 \sim 150 \text{ m}^3/\text{m}$,其中位于抛沙区北缘的剖面 80.50 的淤积量最大,为 $250 \text{ m}^3/\text{m}$ 。根据剖面单宽沙量变化计算得,至 2006 年,海滩总淤积量为 0.24 Mm^3 ,为 1998—2006 年总抛沙量(5.9 Mm^3)的 4%。新沙坝在波浪作用下逐渐向岸迁移,导致沙坝增宽,体积增加,2~3 a 之后,海滩滩面也略有增高,发生淤积。

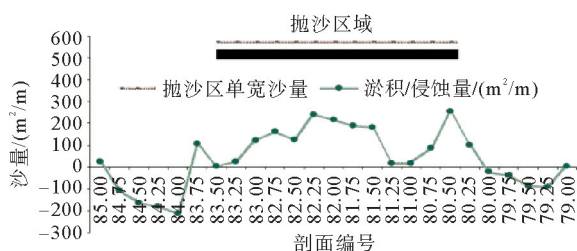


图5 1997—1999年抛沙区单宽沙量($570 \text{ m}^3/\text{m}$)和测量剖面沙量的变化对比(据文献[19])

Fig.5 Differences of the absolute nourishment volume between 1997 and 1999 in comparison with the average volume ($570 \text{ m}^3/\text{m}$) (from reference [19])

4.3 海岸线和沙丘脚变化

通过对不同年份(1980、1997、1998和2006年)沙丘丘脚的位置变化来分析海岸线变化(图6)。抛沙前,沙丘丘脚位置不断后退,发生侵蚀。抛沙后,沙丘丘脚向海迁移了 $10 \sim 22 \text{ m}$,迁移率为 1.9 m/a 。水下抛沙养滩会促进沙丘沙量的增加,导致沙丘丘脚的向海迁移,海滩和沙丘变宽。值得注意的是,1997年和1998年的沙丘脚位置

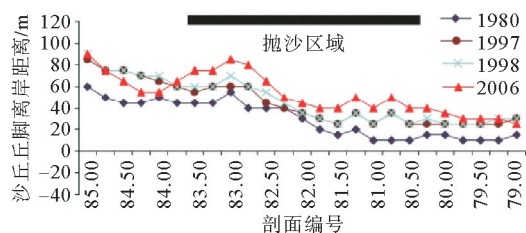


图6 不同年份沙丘脚位置的对比(据文献[19])

Fig.6 Comparison of the dune foot position for four different years (from reference [19])

几乎没有变化,这说明沙丘脚没有对养滩立即响应,而是推迟了几年,这与沙丘沙量变化一致。根据图4可以看出,海岸线向海淤进约 10 m ,而后又向岸侵退,但没有恢复抛沙前的明显侵蚀后退,因此水下抛沙养滩对海岸线具有积极影响。

5 讨论

5.1 抛沙位置

荷兰自 1990 年起,在多地实施了水下养滩工程,其类型以凹槽补沙(泰斯灵岛(1993)^[21])和沙坝补沙(诺德维克(1998)和伊哥蒙特(1999)^[5])两种为主。抛沙区的多余沙将通过迁移逐扩散渐消失,或在沿岸方向上平行迁移,或通过横向输运到更深处,因此不同的抛沙位置有不同的养滩效果。我们将讨论抛沙位置选在沙坝的向海侧更好还是向岸侧更好。

从沙坝形成机制来看,近岸破波对海底产生较强的侵蚀作用,扰动海底沉积物,它们大多以推移质形式向海和向岸迁移。粗颗粒多沉积于海底面上,细颗粒则被水流带走,因此在海底形成平行等深线的较粗粒的破波沉积带,其深度大都在当地闭合深度之内。破波粗粒带内还有一小部分碎屑物质呈悬浮状态,破浪粗粒带的向海侧的泥沙随破浪水流向岸迁移,而向岸侧的泥沙随垂向环流向海迁移,双向运动促使碎屑物质沉积形成水下沙坝。外沙坝的水深较深,往往接近闭合深度,这里波浪相对较弱,底沙较细。若把抛沙位置选在沙坝向海侧,有利于增强外沙坝对波浪的消散能力,也降低了破波对内沙坝的侵蚀,进而增宽海滩。还可以降低暴风期间底沙的向岸运动,接收从海滩流失并向海迁移的泥沙。随着波浪的向岸传播,养滩沙可以形成新沙坝并向岸迁移,有利于稳固海滩。因此,抛沙位置选择外沙坝的向海侧较好,接近闭合深度的海底上最为理想。

5.2 沙坝迁移和海岸线变化的关系

在实施水下养滩之前,诺德维克地区的水下沙坝具有向海迁移的特征。van Enckevort^[22]通过 Argus 视频图像观测到沙坝向海迁移速率为 $0 \sim 10 \text{ m/d}$,内沙坝的最大迁移速度为 0.08 m/d ,

外沙坝为 0.15 m/d 。沙坝通常在春夏季向岸迁移,在秋冬季向海迁移^[8]。Gallagher 等人^[23]认为,在强风浪条件下,沙坝有向海迁移的形势,在低能量条件下,沙坝向岸迁移速度较小。根据波高的不同,沙坝迁移速率的大小和方向可能不同,当有效波高约为 0.6 m 时,沙坝会在向岸迁移和向海迁移之间转变方向。通常内沙坝的迁移速率要小于外沙坝,这是由于波浪在经过外沙坝时,被消减了波能并降低了波高,因此,外沙坝的侵蚀通常大于内沙坝。风暴序列也是引起沙坝向海迁移的重要原因,诺德维克地区的暴风浪多发生于秋冬季。

Wijnberg^[10]利用特征函数分析了近十年内海岸线的变化特征。分析认为,近十年的海岸线波动可能与沙坝系统的大规模动力学有关。在风暴期间,泥沙重新悬浮,海岸泥沙随水流向海迁移导致海岸侵蚀后退,海岸泥沙最终沉积在海滨或浅水前滨(水下沙坝)处,海底面上的泥沙向海更深处迁移导致沙坝向海迁移。实施养滩后,抛沙区消散了波能(消浪效应)使新沙不断向岸迁移(给沙效应),导致沙坝向岸迁移,海滩淤进增宽。但诺德维克地区的海岸线变化没有明显的线性趋势。

5.3 水下养滩的意义

水下养滩的主要目的是向滨面以外抛大量沙,在波浪动力作用下使海滩形成新的平衡剖面,进而达到修复养护海滩的效果。其实质是在人为和自然力相结合的过程中增宽和稳定海滩。诺德维克地区的水下养滩至少起到了 2 种效应,即消浪效应和给沙效应。消浪效应指在波浪越过沙坝时,一部分波能被反射,另一部分波能由于堤顶水深限制而破碎损耗,在外沙坝向海侧抛置大量的沙从而增高了沙坝滩丘,形成的新沙坝增强了消减波能的能力,抑制了泥沙输运,还阻止了暴风浪时海岸沙的外流,可以使泥沙更多的沉积在滩面上,并减少了滩面的沿岸沉积物输运,从而保护了滩面。给沙效应指新沙的向岸迁移并在海滩剖面的较高部分堆积,增加了沿岸沉积物输运,由于泥沙不断供应使滩面淤进增宽。事实上,实地研究表明,沙坝形态的变化主要受 2 种驱动力影响,一是斜向入射波和裂流的输运,二是沿岸流和水平

环流的输运。抛沙区形成的新坝往往会成为动态沙坝系统的一部分,导致了复杂的形态演化。目前还尚不清楚水动力系统对养滩是如何响应的,但可以明确的是,抛沙后,新沙会在波浪作用下发生向岸迁移并逐渐消散,由于迁移速率不同,海床会有一定程度的升高,沉积物会沉积在更靠近海岸的地方。

与其他海岸防护方法相比,水下抛沙养滩有一系列优点:①与护岸堤和防波堤等“硬”工程相比,水下养滩更加经济。因为沙子更便宜,运输方便,甚至可以近地取材,但抛沙补给需要定时重复进行;②水下养滩不会造成环境扰动,更容易与自然环境相互融合,海岸的自然过程几乎不被干扰;③水下养滩是一个非常灵活的海滩防护方法,在任何地方都可以实施,并且可以根据研究区的环境条件进行相应的调整。养滩工程对海滩的影响是一个漫长且缓慢的过程。因此,后期监测调查显得尤为重要,必须进行覆盖整个抛沙区的定期调查。

我国的海滩养护工程均靠向陆上滩面抛沙养护海滩,仅部分地区向滨面外抛沙。截至 2009 年有 13 处约 10.39 km 海滩完成和基本完成了海滩养护工程,共向海滩抛沙 20.3 Mm^3 ^[1],大部分工程初步稳定下 $30 \sim 50 \text{ m}$ 宽的干滩,推动了海滩旅游业的发展。这些向陆上滩面抛沙的养滩工程规模较小,养滩类型丰富,但成本十分昂贵,破坏了环境,且养滩效果不佳,缺少定期调查和研究。我们应该借鉴荷兰等发达国家水下抛沙养滩的成功经验并进行推广。

6 结论

荷兰海岸是低平原平直岸,岸外平缓倾斜分布外、内两条沙坝和坝间凹槽地貌。20 世纪 50 年代以来,在长期海岸抛沙养滩情况下,仍处于海岸微弱侵蚀状态,90 年代以来,实行水下抛沙养滩,先后在泰斯灵岛、伊哥蒙特和诺德维克等 13 处海岸实施过,效果均较好。诺德维克水下养滩工程是其中最好的一例。该区 1998—2006 年先后 3 次向外沙坝向海侧共抛沙约 5.9 Mm^3 ,导致外沙坝由向海迁移转为向岸迁移,海滩自然淤长,按长期定位观测资料计算,至 2006 年,海滩沉积

物量增加了约 0.24 Mm^3 , 相当于 1998—2006 年总抛沙量的 4%, 高潮沙丘脚线向海淤进了 10 m 左右。证明水下抛沙的消浪效应和向岸给沙效应可导致海滩滩面自然增长。水下抛沙修复海滩是当前海滩养护作业中的热点, 它不仅便于施工, 经济便宜, 不干扰海岸环境, 又能很快与环境相融合, 籍自然力驱动下缓慢向滩面输沙, 达到稳定海岸的效果。目前我国数十处海滩养护工程均靠陆上滩面抛沙, 既昂贵又会破坏环境, 且养滩效果有时不佳, 建议更多推行水下抛沙养滩方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Grunnet N M, Hoekstra P. Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling, The Netherlands[J]. Marine Geology, 2004, 203: 23-41.
- [3] 杨燕雄, 杨 雯, 邱若峰, 等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用——以北戴河养滩工程为例[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 23-30.
- [4] Kroon A. The NOURTEC experiment of Terschelling: Process-oriented monitoring of a shoreface nourishment (1993-1996)[C]// Coastal Dynamics, 2014.
- [5] Duin M J P V, Wiersma N R, Walstra D J R, et al. Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(8): 813-837.
- [6] Stronkhorst J, Huisman B, Giardino A, et al. Sand nourishment strategies to mitigate coastal erosion and sea level rise at the coasts of Holland (The Netherlands) and Aveiro (Portugal) in the 21st century[J]. Ocean & Coastal Management, 2018, 156: 266-276.
- [7] Ojeda E, Ruessink B G, Guillen J. Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment [J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1185-1196.
- [8] Enckevort I M J V, Ruessink B G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(5): 501-512.
- [9] Enckevort I M J V, Ruessink B G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(5): 513-532.
- [10] Wijnberg K M, Terwindt J H J. Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis[J]. Marine Geology, 1995, 126(1/4): 301-330.
- [11] Kleinhans M G, Montfort O, Dankers P J T, et al. Mud dynamics on the shoreface and upper shelf, Noordwijk, The Netherlands—paper Z [J]. EU-Sandpit end-book, 2005: Z1-Z15.
- [12] Rijn L C V. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(1): 61-90.
- [13] Ruig J H M D, Louisse C J. Sand Budget Trends and Changes along the Holland Coast[J]. Journal of Coastal Research, 1991, 7(4): 1013-1026.
- [14] 刘海江, 时连强. 海岸带实时地视频观测 ARGUS 技术[J]. 海洋工程, 2016, 34(2): 80-87.
- [15] Grinten R M V D, Ruessink B G. Evaluatie van de kustversterking bij Noordwijk aan Zee—De invloed van de versterking op de zandbanken[J]. Deltares, 2012: 1-53.
- [16] Verhagen H J. Sand waves along the Dutch coast[J]. Coastal Engineering, 1989, 13(2): 129-147.
- [17] Ruessink B G, Jeuken M C J L. Dunefoot dynamics along the Dutch coast[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 27(10): 1043-1056.
- [18] Quartel S, Kroon A, Ruessink B G. Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach[J]. Marine Geology, 2008, 250(1): 19-33.
- [19] Bougdanou M. Analysis of the shoreface nourishments, in the areas of Ter Heijde, Katwijk and Noordwijk[D]. Civil Engineering & Geosciences, 2007.
- [20] Ruessink B G, Wijnberg K M, Holman R A, et al. Inter-site comparison of interannual nearshore bar behavior[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2003, 108(C8): 3249.
- [21] Hoekstra P, Houwman K T, Kroon A, et al. The Nourtec Experiment of Terschelling: Process-Oriented Monitoring of a Shoreface Nourishment (1993-1996) [C] // Coastal Dynamics '94. ASCE, 2014: 402-416.
- [22] Helmut Brückner. Daily to Yearly Nearshore Bar Behaviour by Irene M. J. van Enckevort[J]. Erdkunde, 2004(3): 272.
- [23] Gallagher E L, Steve E, Guza R T. Observations of sand bar evolution on a natural beach[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1998, 103(C2): 3203-3215.

SIGNIFICANCE OF SHOREFACE NOURISHMENT TO COASTAL CONSERVATION IN NOORDWIJK, THE NETHERLANDS

WANG Haiyan¹, ZHUANG Zhen Ye¹, CAO Lihua¹, QIU Ruofeng², ZHANG Yonghua³

(1 College of Marine Geosciences, China Ocean University, Qingdao 266100, China;

2 Hebei Marine Geological Resources Survey Center, Qinhuangdao 066000, Hebei, China;

3 National Marine Environment Testing Center, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to ensure the stability of the beach and coast, three times of shoreface nourishments (1998, 2002 and 2006) have been launched in the Noordwijk, the Netherlands. There are double subtidal bars developed in the study area. For three times, sands are nourished on the seaward side of the outer bar, which is close to the local closure depth. The shoreface nourishment reduced seaward migration rates of the bar. Both the inner and outer bars show a trend of onshore migration and remain stable, which has a positive effect on the shoreline stability. Facts prove that shoreface nourishment may resist against coastal erosion and keep the beach stable by increasing wave dissipation and keeping the nourished sands moving onshore. At present, most of the beach protection projects in China are dominated by beach nourishment, which are economically expensive, environmentally destructive and ineffective, while the shoreface nourishment has the advantages of economy, small impact on the environment and flexibility. We should make full use of the successful experience of shoreface nourishment. In this paper the effects of shoreface nourishments of Noordwijk is studied and analyzed based on Argus video images and bathymetric data. And the significance of shoreface nourishment is summarized to enrich and promote the development of coastal management.

Key words: shoreface nourishment; two-subtidal bars; Argus video images; costal stability