ISSN 1009-2722
CN37-1475/P

海洋地质前沿
Marine Geology Frontiers

第 31 卷第 10 期
Vol 31 No 10

文章编号:1009-2722(2015)10-0041-06

荷兰泰斯灵岛水下凹槽抛沙养滩

崔玉茜,庄振业,马　莹

(中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100)

摘　要:为了维持海岸沙丘和海滩的稳定,抵御日益加重的海岸侵蚀,荷兰泰斯灵岛于1993 年 5—11 月对该岛中段长 4.6 km(13.6～18.2 km 段)的海滩实施大规模的滨面抛沙养滩工程。以驳船吹填式向两水下沙坝(最外沙坝和中沙坝)之间的凹槽区抛沙约 210 万 m^3,单宽沙量约 450 m^3/m。工程后监测发现已填平的凹槽区 6 个月后即发育出新凹槽,但是此工程后得到了 8～10 a 的海岸稳定,纵向运移的泥沙明显降低。事实证明,凹槽抛沙养滩通过凹槽沙的补给效应及消浪效应靠自然力缓慢向海滩滩面输沙稳定了海岸,自然扩宽了滩肩,且不破坏海陆结构,值得在日后的海滩养护工程中研究和推广。

关键词:养滩;凹槽抛沙;水下沙坝;海岸稳定性

中图分类号:P736.21　　**文献标识码:**A　　**DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2015.10006

海滩养护已被普遍接受为抵御海岸侵蚀的最佳措施。国内外许多养滩工程均局限于滩面(潮间带)抛沙养滩,并布设丁坝、岸外坝等硬工程加以护沙[1-3]。近十余年,滨面(低潮线以外)抛沙养滩逐渐成为一些养滩专家的关注点[4,5],滨面水下抛沙养护海滩在不改变海陆结构,不布设硬工程的情况下,也可达到稳定海岸和扩宽海滩的目的[6]。水下抛沙可以抛在水下沙坝的两侧,杨燕雄等做过近岸沙坝养滩的研究和实践[7],也可以抛填于沙坝间的凹槽上,泰斯灵岛的水下抛沙(图1)就是后者的典型案例,受到许多国外专家的青睐[8,9]。目前,我国尚未见该类养滩工程案例。本文通过介绍该岛水下凹槽抛沙养滩的过程、监测和效果,结合区域水文泥沙运动特点和众多模型实验资料分析其养滩机理,以充实和推动我国养滩业的发展。

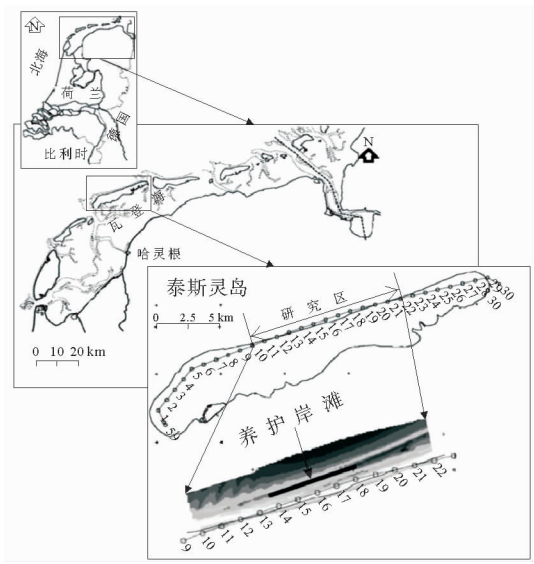


图 1　泰斯灵岛研究区和滨面养护范围
(提供了 1 km 间隔的监测剖面基点号,据文献[4])

Fig. 1　Location of Terschelling island and scope of shoreface nourishment
(Also provided is the number of profile for 1 km interval each, from reference [4])

收稿日期:2015-03-16

基金项目:福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室项目(CIMTS-2014-01)

作者简介:崔玉茜(1990—),女,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail:cuiyuqian715@126.com

1 区域环境

泰斯灵(Terschelling)岛位于荷兰西北岸外,是沿荷兰、德国和丹麦海岸 SWW—NEE 向延伸的障壁岛链的一部分,该岛北临北海,南逼瓦登海,东西两端分别以宽阔的博恩(Borndiep)和弗利兰(Vlie)潮流通道及其相关的潮流三角洲与邻岛相望[10]。泰斯灵为一沙岛,全岛分东中西 3 段,长约 30 km,宽约 2～3 km,NEE—SWW 向延伸,中段是监测和养滩段,长约 4.5 km,高潮线以上的后滨带沙丘连绵,高低潮线之间宽约 1 100～2 000 m,分布几条平行海岸的沿岸沙坝和坝间裂流流道。总体坡度约 0.004 5,低潮线向海直至水深 8 m(通常是闭合深度),约距岸 200～400 m,大致分布 2～3 条水下沙坝[11]。最外侧沙坝在 6 m 水深处。沙坝之间为凹槽地貌,宽约 200～400 m,水深 9 m,坝槽高差 2～3 m,凹槽海底为细砂,中值粒径 $D_{50}=0.165$～0.178 mm,细于沙坝砂[12]。

北海泰斯灵岛沿岸海区潮汐属于半日潮区,小潮潮差 1.2 m,大潮潮差 2.1 m。涨潮流(向东)稍微强于落潮流(向西)。潮流椭圆基本平行海岸,并且几乎成直线,属于往复流,平均潮流流速 0.3 m/s,风暴潮期间,有效波高达 5～6 m,周期 10～15 s,风海流速可达 0.5 m/s,是启动海底砂质物运动的主要动力[13]。在泰斯灵海岸所观测的平均岸线位置的行为显示,从 1965 年到 1993 年岛中段海岸线平均后退速率为 0.5 m/a。泰斯灵海滩前部的波候测量显示,年平均有效波高是 1.1 m,有效波浪周期为 7.2 s[11]。在强烈风暴期间,波高升至 7 m,周期大约为 14 s。波浪大致从西方和东北方向入射。入射角在 Hs<1 m 的条件下并没有表现出优势值,然而,具有中等高度的波浪(1<Hs<3 m)主要从西方和北方接近海岸。最具能量的波场从海岸法线方向接近或者仅仅同海岸法线方向保持较低角度。沿岸发育沙丘前的侵蚀陡坎,抛沙养滩后岸线稳定偏淤。

泰斯灵障壁岛的两侧是 2 个潮流通道,即西部的弗利兰潮流通道和东部的博恩潮流通道(图 2)。潮道有重要的低潮潮汐三角洲分别向海扩展 9 和 6 km[5]。泰斯灵大尺度的类沙波起伏在西北部绕过 Vlie 潮流通道。起伏的最大振幅为 2 m,波长几乎是常数,约为 1 km[14]。这个沙坝模式迁移往东南方向平均速率约 500 m/a,最终在沿岛的西部登陆,大约剖面 14 附近。近岸区的沿岸输沙主要是转向东方。经计算每年的净平均沿岸输沙率从 50～60 万 m^3/a 到 100 万 m^3/a[15]。

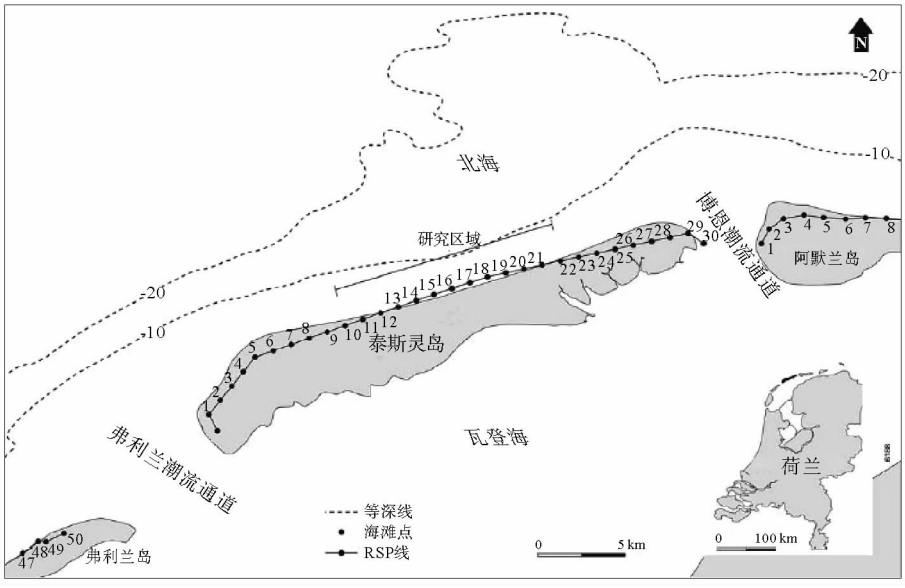


图 2 研究区和潮流通道位置(据文献[5])

Fig. 2 Locations of study area and tidal inlets (from reference [5])

2　数据和方法

泰斯灵岛的研究数据主要来自于长期监测所得到的测深数据。测深数据集由来自 2 个监控项目的声呐数据系列组成，分别是 1965 年在泰斯灵岛开始启动的每年的 JARKUS 项目，另一个是 1993 年开始的为期 3 年的 NOURTEC 项目。在 NOURTEC 监测计划中，从 1993 年 2 月到 1996 年 12 月每隔 3 个月总共进行了 14 次调查。在 2 个项目中，测线走向垂直于沿岸的基线（RSP 线）并且从水边低沙丘延伸到近滨沙坝区的外边缘。沿岸间隔 200 m 进行探测。垂向探测精度大约 0.1～0.2 m，定位的误差达 10 m[10]。垂岸剖面数据在相邻 2 个测深点之间按 10 m 等距的间隔建立。为了获得在一般垂岸点的深度估计值，每一个垂岸剖面的参考线设置在平均海平面之上 +1 m的高度[16]。

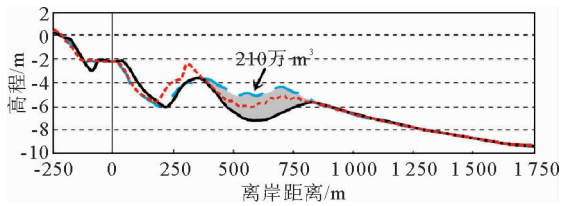
粒度数据主要来自于泰斯灵岛研究区的实地取样。从沙丘底部到水深 15 m 处分别取样。表层样（3～5 cm 深）用手取，其他样品在近岸带用水下抓斗获取。在整个取样过程中，分别在剖面 10、12、14、16、18、20、22 等处（见图 1）进行了比较系统地采样。1994 年 4 月和 10 月又在剖面 15、17 以及水深较深的剖面（如剖面 10、14 和 20）等处取样。用于分析研究的全部样品数为 1 069 个[17]。

为了分析泰斯灵岛凹槽养滩的效果和影响，主要通过模型模拟和实地监测的方法进行分析。M Grunnet 等[12]通过平衡剖面模型获得了剖面变化的数据。利用 2 次连续测量点深度之间的线性插值。通过在 1965—1993 年期间的平均 JARKUS 剖面项目，得到 28 a 的平均剖面形状。

3　抛沙养滩工程和效果评估

3.1　养滩过程

为了维持海岸沙丘和海滩的稳定，抵御日益加重的海岸侵蚀和海滩蚀低，荷兰于 1993 年实施大规模的滨面抛沙工程。当年 5—11 月对 T 岛中段长 4.6 km（13.6～18.2 km 段）的海滩开始滨面养滩。以驳船吹填式向两水下沙坝（最外沙坝和中沙坝）之间的凹槽区抛沙约 210 万 m^3，单宽沙量约 450 m^3/m。该凹槽区带宽 200～400 m（距岸约 500～900 m），槽底水深 5～6 m（荷兰平均海平面以下），槽深（坝顶至槽底高差）约 1～3 m，平均 1.5 m，一次性抛沙填平了凹槽。新沙取自岸外 10 km 水深 20 m 处海底，粒度中值粒径 D_{50} 为 0.188～0.266 mm，平均 0.196 mm，粗于原滩约 0.02 mm。监测发现已填平的凹槽区 6 个月后即发育出新凹槽[17]，但是此工程后得到了 8～10 a 的海岸稳定，纵向运移的泥沙明显降低。



1993 年 4 月（黑实线）；1993 年 11 月（蓝长虚线）；1996 年 6 月（红短虚线）

图 3　泰斯灵岛滩面养护剖面的变化（据文献[4]）

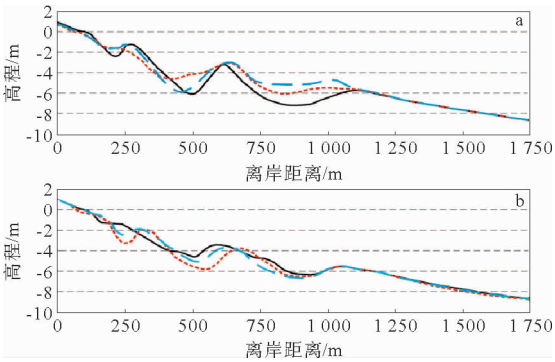
Fig. 3　Profile change after shoreface nourishment at Terschelling (from reference [4])

3.2　养滩效果

在泰斯灵岛中段，1965 年以来共设 13 条观测剖面线，观测范围达距离岸线 2 000～2 500 m 附近，涵盖滨面外、中、内 3 条水下沙坝和坝间凹槽，据 Witteveen（2006 年）统计，1965—1993 年间平均岸线蚀退率为 0.5 m/a[18]，沿岸沙丘前缘发育不高的永久陡坎，属于弱蚀的海岸形势。但 1993 年对外中沙坝间的凹槽大规模抛沙养滩之初，除开始半年岸线仍然微蚀之外，随后几年里岸线出人意料的长期向海迁移，淤进速率一般为 1～2 m/a，最高达 14 m/a[16]。随后直至 2002 年，岸线逐渐稳定至微淤，纵向运移的泥沙也明显降低。

Grunnet 等[5]总结了 1993—1999 年的监测剖面数据，提供了第 16 剖面线的变化资料（图 4a）。水下凹槽抛沙海岸长 4.6 km，该范围内监测剖面加密，监测次数增加（3～4 次/a）。在 1993 年 11 月抛沙完毕后，凹槽被填平（图 4a 蓝长虚线），至 1994 年 6 月新凹槽开始发育（图 4a 红短

虚线),海底有所加深,泥沙向岸迁移至中沙坝向海侧,随后 1995 年 7 月至 1999 年 3 月凹槽缓慢加深(图 4b),初期(养滩后 6 个月内)凹槽大量沙补给中沙坝,使沙坝增高加宽 2 m,后来不断向岸边补给。



a 1993 年 10 月(黑实线),1993 年 11 月(蓝长虚线),1994 年 6 月(红短虚线);
b 1995 年 7 月(黑实线),1997 年 5 月(蓝长虚线),1999 年 3 月(红短虚线)

图 4 剖面 16 的水深与离岸距离(据文献[5])

Fig. 4 Depth versus cross-shore distance of profile 16 (from reference [5])

另据 Grunnet 等[5,11],最外沙坝在凹槽抛沙之后也显著增宽,单宽体积从 170 m^3/m 增加到 300 m^3/m,宽度达 400 m,坝顶水深为 6 m。Guillen 等[17]从监测剖面上粒度变化方面总结了凹槽抛沙养滩的效果,原滩(抛沙之前)凹槽海底 $D_{50}=0.165\sim0.178$ mm,平均 0.171 mm,抛沙粒度 $D_{50}=0.180\sim0.226$ mm,平均 0.196 mm,抛沙 6 个月后,凹槽海底基本恢复原滩粒度。说明半年就可以渡过养滩后的快速剖面回返重建期[19]。该段海岸线动态直观显示了凹槽抛沙后的 8～10 a 期间海岸线从微蚀(0.5 m/a)转为稳定—微淤,抛沙前岸线附近的沙丘前缘永久性不高的陡坎不见了,变成平缓向海倾斜的海滩。说明凹槽抛沙养滩不需建什么丁坝或岸外坝等硬工程,就可以导致海滩的 8～10 a 的稳定,甚至微淤和扩宽。

4 讨论

海滩养护的工程主轴是向海滩抛沙,在波浪动力作用下塑造新滩平衡剖面,达到扩宽和稳定海滩的目的。海滩地貌包括低潮线以上的滩面和滩肩以及低潮线以下的滨面(水下沙坝和坝间凹槽),许多海滩养护工程设计人员常常将沙抛于滩面上,称为滩面养滩,立即形成滩肩宽阔而滩面上部较陡的海滩,称为新滩。随后,在波浪作用下,所抛沙向海流失,塑造较缓的新滩平衡剖面[20]。而向滨面抛沙也可以形成下部较缓的海滩,仍然在波浪作用下,沙向岸运移再塑造新的平衡剖面[21]。无论向滩面还是向滨面抛沙,其实质都是在人为力与自然力相结果的过程中扩宽和稳定了海滩。这一过程早已在实验中得到验证[22]。滩面抛沙养滩工程比较直观,已有 30 多年的实践。滨面抛沙养滩将沙抛在水下,其效果需长期缓慢的从海岸上表现出来[23]。滨面抛沙养滩开展较晚,除泰斯灵岛外,还有法国的利翁湾[19],美国的佛罗里达[24],日本的波崎[25]以及南非的德班海滩[26]等。就水下养滩而言,有的放沙于水下沙坝上,有的放沙于坝间的凹槽内。泥沙运移机理虽有差异,但效果均较好,泰斯灵岛工程是凹槽抛沙的典型案例。

水下凹槽沙的运动与凹槽两侧的水下前沙坝和中沙坝的迁移密切相关。沙坝凹槽是密切相关的统一沉积体系,它们的动态变化都是水动力引起的泥沙运动所致,而凹槽养滩却受到许多学者的关注。Grunneta 和 Ruessinka 利用泰斯灵岛标准形态动力学模型模拟水平和垂直的潮流,风和波浪的不同组合得出波浪和波流对泥沙的搅动和输移起主导作用[11]。由于岛前具有强烈的风和相对小的潮流(平均 0.3 m/a,最大 0.5 m/a),虽有起动泥沙的作用,但平时潮流几乎没有净输沙能力,沿岸盛行风往往接近平行海岸,风流不能助长潮流,所以潮控和风控流对凹槽海底泥沙的输运力均十分有限。盛行波浪有效波高达 1.1 m,特别是暴风浪期间北向浪达 7 m,是运移水下沙坝和凹槽泥沙的主要动力。实验室验证风暴大浪在外沙浪向海侧提前破浪,并且翻越坝顶在外沙坝向岸侧形成垂坝涡流,将凹槽泥沙带向外沙坝,只要凹槽抛沙后,遇到一次暴风浪就开始凹槽新生,同时外沙坝的增高扩宽直接提高沙坝的消浪能力[22]。平和天气里,波浪参数小,更多的波浪仅在凹槽和中沙坝上开始强烈不对称,进而在中沙坝上破浪,将凹槽近中沙坝部分的泥沙带至

中沙坝，并使凹槽海底泥沙向岸运移。

综合来看，泰斯灵的滨面凹槽抛沙养护至少起 2 种效应，即补给效应和消浪效应。补给效应包括养护沙的缓慢向岸运动，恢复了海滩剖面的上部分，使滩面淤长增宽；消浪效应指向凹槽抛沙养护增高了凹槽和沙坝的海底，增强了消散波能的能力，也可使泥沙更多的沉积于滩面上，从而也保护了滩面，并且减少了滩面附近的沿岸沉积物运移。因此，凹槽抛沙相当于水下储沙库，不断向外沙坝和滩面缓慢输沙。最终都使海滩滩面缓慢淤长和稳定。

5　结论

(1)泰斯灵岛位于荷兰西北岸外，是障壁沙岛，受北海暴风浪的影响，沿岸泥沙向东运移。平均沿岸净输沙率为 50～100 万 m^3/a。1965—1993 年岛中段海岸线平均后退速率为 0.5 m/a，沿岸沙丘被蚀成永久性 1 m 高的陡坎。

(2)荷兰于 1993 年 5—11 月对该岛中段 4.6 km 长的海滩开始滨面养滩。向两水下沙坝(最外沙坝和中沙坝)之间的凹槽区抛沙约 210 万 m^3，单宽沙量约 450 m^3/m。该凹槽带宽 200～400 m(距岸约 500～900 m)，槽底水深 5～6 m(荷兰平均海平面以下)，槽深(坝顶至槽底高差)约 1～3 m，平均 1.5 m。抛沙填平了凹槽，新沙粒度中值粒径 D_{50} 为 0.188～0.266 mm，平均 0.196 mm，粗于原滩约 0.02 mm。监测发现已填平的凹槽区 6 个月后即发育出新凹槽，同时外沙坝增高，中沙坝增宽和向岸迁移，海滩微淤稳定，10 a 不减。

(3)凹槽抛沙抬高了海底高程，降低了海底坡度，增强了水下消浪作用，凹槽沙的不断向岸输送，对海滩起到长期的补沙作用，依靠自然力达到海滩的长期扩宽和稳定。

(4)向滩面抛沙养滩已是被普遍接受的减小海岸侵蚀的方法，滨面凹槽补沙养滩在我国尚无一例，它不破坏海陆结构，不需大量水泥硬工程，就可达到稳滩和淤滩的目的，值得在日后的养滩工程中研究和推广。

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]　庄振业，王永红，包　敏，等. 海滩养护过程和工程技术[J]. 中国海洋大学报，2009，39(5)：1019-1024.

[3]　迪安 R G. 海滩养护：理论与实践[M]. 蔡　锋，等，译. 北京：海洋出版社，2010.

[4]　Hamm L，Capobianco M，Dette H H，et al. A summary of European experience with shore nourishment[J]. Coastal Engineering，2002，47：237-264.

[5]　Grunnet N M，Ruessink B G. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment[J]. Coastal Engineering，2005，52：119-137.

[6]　Grunnet N M，Walstra D J R，Ruessink B G. Process based modelling of a shoreface nourishment[J]. Coastal Engineering，2004，51：581-607.

[7]　杨燕雄，杨　雯，邱若峰，等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用——以北戴河海滩养护工程为例[J]. 海洋地质前沿，2013，29(2)：23-30.

[8]　Spielmann K，Certain R，Astruc D，et al. Barusseau. Analysis of submerged bar nourishment strategies in a wave-dominated environment using a 2DV process-based model[J]. Coastal Engineering，2011，58：767-778.

[9]　Brunel C，Certain R，Sabatier F，et al. 20th century sediment budget trends on the Western Gulf of Lions shoreface (France)：An application of an integrated method for the study of sediment coastal reservoirs[J]. Geomorphology，2014，204：625-637.

[10]　Hoekstra P，Houwman K T，Kroon A，et al. The NOURTEC experiment of Terschelling：process-oriented monitoring of a shoreface nourishment(1993-1996) [C]// Proceedings 1st International Conference on Coastal Dynamics，ASCE，New York，1994：402-416.

[11]　Grunnet N M，Ruessink B G，Walstra D J. The influence of tides，wind and waves on the redistribution of nourished sediment at Terschelling，The Netherlands[J]. Coastal Engineering 2005，52：617-631.

[12]　Grunnet N M，Hoekstra P. Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling，The Netherlands [J]. Marine Geology，2004，203：23-41.

[13]　van der Molen J. The influence of tides，wind and waves on the net sand transport in the North Sea[J]. Continental Shelf Research，2002，22：2739-2762.

[14]　Biegel E J，Spanhoff R. Effectivity of a shoreface nourishment，Terschelling，The Netherlands[R]. National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ and SEPRA BV，1996.

[15]　Biegel E J，Spanhoff R. Large and small scale coastal behaviour and the effect of the shoreface nourishment at Terschelling，The Netherlands[R]. National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ and SEPRA BV，1999.

[16] Li F G, Dyt C, Griffiths C. Multigrain sedimentation/erosion model based on cross-shore equilibrium sediment distribution: Application to nourishment design[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67: 664-672.

[17] Guillen J, Hoekstra P. Sediment Distribution in the Nearshore Zone: Grain Size Evolution in Response to Shoreface Nourishment (Island of Terschelling, The Netherlands) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 45: 639-652.

[18] Witteveen B. Evaluatie onderwatersuppleties Noord- en Zuid-Holland[R]. 2006.

[19] 邱若峰,庄振业,赵友鹏,等. 海滩养护的功效和寿命——以北戴河海滩养护工程为例[J]. 海洋地质前沿,2014,30(3):26-33.

[20] van Rijn L C. Coastal erosion and control[J]. Ocean & Coastal Management, 2011, 54: 867-887.

[21] van Enckevort I M J, Ruessink B G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23: 501-512.

[22] Grasso F, Michallet H, Barthélemy E. Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events: A morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis[J]. Coastal Engineering, 2011, 58: 184-193.

[23] Niemeyer H D, Kaiser R, Knaack H. Effectiveness of a combined beach and shoreface nourishment [C]// Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, New York, 1996: 4621-4634.

[24] Browder A E, Dean R G. Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA[J]. Coastal Engineering, 2000, 39: 173-191.

[25] Kuriyama Y, Lee J H. Medium-term beach profile change on a bar-trough region at Hasaki, Japan, investigated with complex principal component analysis[C]//Proceedings of Coastal Dynamics, ASCE, New York, 2001: 959-968.

[26] Wijnberg K M. Large scale, decadal behavior of nearshore morphology: three case studies of multiple barred coasts [J]. Geographical Development in Coastal Morphodynamics, 1998, 3: 185-203.

UNDERWATER TROUGH NOURISHMENT AT TERSCHELLING ISLAND, THE NETHERLANDS

CUI Yuqian, ZHUANG Zhenye, MA Ying

(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to maintain the stability of coastal dunes and beaches against increasing coastal erosion at the Terschelling island of The Netherlands, shoreface nourishment was implemented in the middle of the island from13. 6 km to 18. 2 km on November 5, 1993. 2. 1 Mm^3 of sands were nourished in the trough between two underwater bars, i. e. the most outside bar and the middle bar, and the average volume of nourished sand is around 450 m^3/m per meter of width. Six months later, a new trough appeared again at the site of nourishment. However, the beach remained in stability for 8～10 years. The vertical movement of sediment decreased obviously. It is confirmed that trough nourishment may weaken the wave effect and transfer the sediments to the beachface to stabilize the coast and to broaden the berm automatically without damage of the sea-land pattern. It is worth to research and promote beach nourishment as such in the future.

Key words: shoreface nourishment; trough nourishment; offshore bar; coastal stability