

海滩养护动力地貌基础理论与关键技术研究述评*

郑金海^{1,3} 张弛^{2,3}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏南京 210098; 3. 河海大学港口海岸与近海工程学院 江苏南京 210098)

摘要 海滩养护是砂质海岸最重要的自然防护手段之一,也是我国海岸带保护修复工程最重要的建设内容之一。围绕强波浪动力、弱波浪动力、强潮等不同条件下的养护海滩动力适应性与滩肩、沙坝等地貌稳定性及其模拟预测三个主要方面,总结近年来我国海滩养护基础理论和关键技术研究中的新认识和新思考,并提出亟需深入研究的重点内容。

关键词 海滩养护; 动力适应性; 地貌稳定性; 基础理论; 关键技术

中图分类号 TV148; P753 **doi:** 10.11693/hyhz20220100006

砂质海滩(亦称沙滩)具有重要的防灾减灾、滨海旅游和生态服务等功能,是海岸带高质量发展和沿海人民生活质量提升所依赖的最重要的国土空间资源之一。海滩动力地貌过程复杂活跃、人类活动频繁、资源保护利用与滨海经济发展互馈效应明显,兼具突出的物理属性、生态属性和社会经济属性,因此一直是海岸带保护修复、防灾减灾和综合管理的关注热点。然而,海平面上升、风暴作用增强、流入海泥沙减少、人工采砂和不合理的沿岸工程建设等自然或人为因素正在迅速挤压海滩的生存空间,全球范围内约 24% 的砂质岸线正在以超过 0.5 m/a 的速率持续后退(Luijendijk *et al.*, 2018),我国也有约 49.5% 的海滩正在遭受侵蚀(林峰竹等, 2015)。如果不采取合理的应对措施,海滩侵蚀退化的趋势在 21 世纪内将会继续加剧(Vousdoukas *et al.*, 2020)。

海滩养护是通过将补给泥沙吹填在海滩上,达到拓宽干滩或缓解侵蚀的目的,具有环境亲和性强、促进滨海旅游业发展等优点(Dean, 2003)。它是一种基于自然的解决方案,即发挥自身防灾减灾能力的同时,为生态恢复和休闲亲水提供载体。海滩养护最早始于美国,之后被逐渐推广到欧洲等国家,目前已成为国际上最受认可和广泛采用的砂质海岸柔性防护手段,并开始呈现出设计形式多样化、目标功能多

元化和多学科交叉研究等发展趋势(Stive *et al.*, 2013)。近一个世纪(1921~2020)的美国海滩养护工程统计数据表明,即使到现在,补沙量仍然呈现指数型增加的趋势(Elko *et al.*, 2021)。相比于欧美等发达国家,我国海滩养护起步较晚但发展非常迅速,近十年间已实施的海滩养护工程数量、规模、补沙强度和成本投入在不断增大,涉及 100 余项工程、近 40 个沿海城市、修复岸线总长度约 120 km、总填沙量约 $2.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ (蔡锋等, 2019; Liu *et al.*, 2020; 戚洪帅等, 2021)。这些海滩养护工程产生了显著的综合效益,已成为我国海岸带保护修复工程最重要的建设内容手段之一。国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要要求进一步实施海岸带生态保护和修复重大工程,持续加强海滩养护基础理论研究和创新海滩养护关键技术是其中的重要需求。

目前针对海滩养护的研究更多侧重在物理过程层面上,以养护海滩的动力适应性和地貌稳定性等为主要基础研究对象,以海滩养护的设计、施工、监测、模拟和评估方法等为主要技术创新支撑,以优化设计及施工方案、减小侵蚀速率或泥化程度、预测泥沙流失量和使用寿命、提升养护修复效果和管理维护水平等为主要工程应用目标。由于我国海岸具有纬度跨度大、人工化程度不一、自然海滩类型多样和动力

* 国家自然科学基金重点项目, 41930538 号; 国家自然科学基金面上项目, 51879096 号。郑金海, 教授, 博士生导师, E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-10, 收修改稿日期: 2022-03-14

地貌环境多变等特点, 海滩养护往往在 高能/低能波浪、强潮/弱潮和砂质/泥质本底等迥异的环境中实施, 所面临的问题也各不相同。尽管我国海滩养护的研究和实践已取得了一定的成就, 但是在全球气候变化、灾害风险加剧和砂源紧缺的大背景下, 面向生态文明建设和可持续发展的需求, 海滩养理论和方法在科学化和精细化等方面仍需要进一步提升。本文围绕海滩养护的动力适应性、地貌稳定性及其模拟预测三个主要方面, 总结近年来我国海滩养护基础理论和关键技术研究中的一些新认识和新思考。

1 海滩养护的动力适应性

天然沙滩在波浪等动力作用下, 已逐渐演变成适应于当地海岸动力环境的形态。一般认为, 适合具有一定体量的沙滩存在的海岸, 近岸波浪既不能太强也不能太弱。前者容易引起沙滩侵蚀, 后者则容易产生沙滩泥化。由于养护后的沙滩形态、泥沙粒径和沉积物组成往往有别于天然状态, 加之一些辅助工程建筑物的影响, 沙滩与动力环境之间的天然平衡关系被打破, 需要经历一段时间的重新调整适应。这个适应过程可能会伴随着填补泥沙的流失、沙滩泥化或粗化等现象, 影响海滩养护工程的成败和使用效果。

在强波浪动力侵蚀岸段, 泥沙流失快, 养护海滩稳定性较差。为了解决这个问题, 工程中较多采用拦沙堤、潜堤等各类辅助建筑物来减弱波浪作用, 降低输沙强度和维持沙滩形态。这些辅助建筑物需要结合当地波浪的传播变形特性来科学设计, 尽可能维持养护区水沙运动的自然畅通, 在消浪固沙的前提下又不会过分削弱泥沙活动性或引起新的侵蚀热点。波浪作用下的床面剪切力是衡量泥沙活动性和预测岸滩侵蚀的重要物理量, 而在现场尺度的大浪条件下, 较强的波致雷诺应力会压制波浪边界层发育使其发生“薄化”现象(Xie *et al.*, 2021), 产生的床面剪切力比传统理论和方法的预测结果更大, 底部边界层中的高浓度悬沙层化引起的紊动抑制和沉降阻碍效应也会显著影响泥沙净输移方向(Zhang *et al.*, 2014)。一些研究尝试不借助辅助建筑物的手段, 而是通过优化养护海滩的沉积物组成来达到抑制泥沙输运强度的目的。例如厦门天泉湾的海滩养护工程提出了“天然卵石(滩面耗能层)+级配碎石(强渗透垫层)+二片石(基础持力层)”的卵石分层海滩养护技术, 利用卵石滩面高消能和强渗透的特点, 有效降低了沿岸输沙量和岸线蚀退速率,

起到了较好的稳定效果(Shu *et al.*, 2019)。

在弱波浪动力海岸, 泥沙活动性差, 养护海滩易发生泥化。特别是在泥质海岸塑造人工沙滩, 属于异质养护, 由于先天波浪动力不足和海水中的细颗粒悬沙沉降附着, 沙滩泥化往往是面临的最关键问题。国内开展过的此类工程(例如天津东疆人工沙滩工程等)大多利用建设围堤、近岸清淤、沙滩底泥吸收等措施来隔离高含沙量海水、增强滩前波高和降低泥化高程等(解鸣晓等, 2017)。沙滩泥化与波浪条件、底质环境和外源输入泥沙特性等因素密切相关, 其中波高大小和泥化高程之间存在较强的负相关关系(Zhao *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2021)。准确预测泥化高程的时空变化需要对弱动力条件下不同组分的泥沙起动和悬浮有深入的认识, 最新研究修正了传统无黏性泥沙上扬通量计算公式在低流速环境中(泥沙起动阈值附近)的不足(Chen *et al.*, 2022), 并提出了考虑含泥量及干容重的非单调影响的沙泥混合物临界冲刷切应力计算新公式(Chen *et al.*, 2021)。一些研究通过布置向海开放性岬头、重构水下辐聚地形并辅以近岸底床清淤, 提出了“岬角聚能”波能调控技术, 借助波浪辐聚效应增强局部波浪强度和重构沙滩发育的自然动力环境, 在广西茅尾海等海滩养护工程中得到成功应用(温昌麒等, 2021)。

除了波浪, 潮汐和风也是影响沙滩演变的动力因素。在强潮海岸, 潮汐水位变化对沙滩演变具有不可忽视的调制效应, 引起波浪破碎带移动、沙滩冲淤范围增大、滩面平均侵蚀强度降低和岸滩坡度变缓, 这个效应可用一个综合考虑潮汐、波浪和沙滩形态的浪潮作用指数来描述(Qi *et al.*, 2010)。更大的水沙运动空间和复杂的潮间带地貌形态意味着在强潮海岸进行海滩养护, 可能需要更多的补沙量和更长更高的辅助建筑物来维持沙滩形态, 在预测泥沙流失量时也需考虑时变潮汐水位的影响。在风力较强的海岸, 风沙输运可成为养护海滩泥沙流失和后方陆域或沙丘泥沙堆积的重要来源(Hoonhout *et al.*, 2017)。与此同时, 海滩养护使滩面形态和宽度、风区长度、泥沙粒径、植被覆盖、潮汐淹没及滩面湿度等发生变化, 也会显著影响风沙输运强度(张弛等, 2022; He *et al.*, 2022)。

虽然我国学术界和工程界针对不同动力环境下的海滩养护已开展了许多研究, 但目前仍然缺乏一个简便实用的指标来评估海滩养护的适宜性。对于某一个具体工程实施而言, 这个不足给海滩养护工程的可行性论证带来不确定性。对于更大层面上的管理

工作而言, 这个不足使得地域性或全国性的海滩养护适宜性分区或空间规划十分困难。其中的主要原因, 一方面来自于多尺度海岸水沙运动过程本身的高度复杂性; 另一方面是因为大范围长时间的海岸动力环境、沉积物特性、历史演变规律、受损机制和养护效果分析等方面仍十分缺乏系统的基础数据支撑。近年来的一些研究建立了近 40 年的中国近海波浪数据库 CWAVE (Shi *et al*, 2019; 徐佳丽等, 2019) 和岸线数据库 CLINE (李方明, 2021), 并初步分析了大陆沿海尺度上的不同重现期波浪参数、波能分布和岸线形态的时空变化规律, 可为进一步分析和量化不同区域的海滩养护适宜性提供数据基础。

2 海滩养护的地貌稳定性

养护海滩的地貌演变过程通常由较长时间尺度的岸线变化和较短时间尺度的剖面变化所组成, 导致最终形成的地貌形态与刚建成时存在一定差异。由于这个过程当中的岸滩侵蚀量、泥沙流失率、岸线进退速率和侵蚀热点与海滩养护工程的实施效果、使用体验、再补沙周期和后期维护密切相关, 准确认识地貌稳定性并在此基础上优化设计方案是海滩养护工程的关键环节。过高估计养护海滩稳定性可能会导致沙滩不能满足使用要求和增加维护成本, 过低估计养护海滩稳定性可能会使设计方案偏保守和带来不必要的成本投入。

风暴作用下的沙滩地貌稳定性是海滩养护工程最关心的问题之一。传统的理论观点认为, 风暴期间的大浪和高水位会引起离岸输沙、滩肩侵蚀和泥沙流失, 而海平面上升将不可避免导致沙滩灭亡。然而在实际中并非完全是这个情况, 且在风暴作用期间的沙滩动力地貌过程的现场观测也非常少。Cao 等(2020)和 Chi 等(2021)研发了海岸带岸基数字影像监测系统 COSVIMS, 可实现全天候实时连续监测, 并已成功应用于日照海龙湾退港还海人工沙滩修复工程, 为工程前的海堤风暴越浪、施工中的动态岸线变化和工程后的沙滩地形演变监测分析提供了新方法。现场观测结果(Cao *et al*, 2020)发现, 2019 年“利奇马”台风过境期间, 日照人工沙滩的泥沙不仅没有向海输运和流失, 反而是向岸输送并堆积形成更高的滩肩, 总体泥沙流失量很少。这一现象和传统认识是不相符合的, 说明实际中的养护海滩可能比想象中具有更强的“韧性”或地貌自适应能力。COSVIMS 系统在“利奇马”台风过境期间采集到的影像数据证实了波浪冲越输

沙是其中的主导物理机制, 波浪冲越的发生及其地貌效应与破波带类型、泥沙粒径、前滩坡度、滩肩高程和后滩形态等密切相关。因此, 深入研究海滩养护影响下的冲流带水沙运动机理, 对于进一步优化海滩养护设计以更充分发挥潜在的地貌自适应能力具有重要意义。

近岸人工沙坝是一种重要的海滩养护手段, 它具有成本低、施工效率高、环境影响小和长效养滩等特点, 是逐渐兴起和极具发展潜力的养滩方式, 在我国北戴河海滩养护等工程中也开始得到应用(杨燕雄等, 2014)。一般认为, 人工沙坝的养滩功能主要体现在风暴期间的遮蔽效应和常浪期间的喂养效应, 最终的养滩效果很大程度上取决于这两大效应的发挥。最近的一系列物模试验研究(Li *et al*, 2021a, 2022)发现, 不同于风暴条件下海滩剖面离岸输沙的传统认识, 一定形态的人工沙坝在大浪作用下可引起局部向岸输沙和向岸沙坝迁移, 从而改变海滩整体冲淤状态和岸滩响应规律。同时, 人工沙坝会使得滩肩风暴响应存在时间上的滞后性, 即人工沙坝的遮蔽效应在沙坝形态演变过程中具有动态性, 据此提出了考虑人工沙坝形态参数的破波相似系数, 建立了人工沙坝与滩肩之间的地貌形态耦合关系式。研究发现常浪条件下的人工沙坝呈现“增长型”和“衰减型”两种喂养模式, 底部离岸流增强人工沙坝向岸侧的总输沙率变化梯度, 是控制人工沙坝喂养模式的重要机制(李元, 2021)。上述研究证明, 合理设计和建造人工沙坝等新的地貌单元, 可以促进风暴来临时海滩剖面上的泥沙维存及加强风暴后的岸滩自然恢复, 为进一步增强养护海滩韧性提供了新思路。

滩肩陡坎是指示沙滩稳定性的一种重要地貌特征。滩肩陡坎不仅经常被用来反映岸滩侵蚀趋势, 也会对沙滩使用体验和游客安全造成不利影响(陆旭等, 2021)。滩肩陡坎的形成和分布, 取决于岸滩总水位和滩面高程的相互关系(Van Bemmelen *et al*, 2020)。但是, 滩肩陡坎并不一定只在侵蚀性海岸才会出现。由于海滩养护改变了沙滩的天然形态, 过高的补沙滩肩高程容易引起高潮位附近的滩肩陡坎。这种现象在荷兰 Sand Engine、日照海龙湾和珠海美丽湾等海滩养护工程实施后都出现过, 并呈现出不同的陡坎形成—发展—稳定—消亡规律(Van Bemmelen *et al*, 2020; Liu *et al*, 2021)。事实上, 海滩养护后形成的滩肩陡坎不仅与波浪上冲回落冲刷泥沙有关, 也可能与沉积物特性和地下水过程有关, 因此在补沙剖面

设计和砂源适宜性分析时也应关注补沙对滩肩陡坎等局部地貌的影响。

3 养护海滩演变的模拟预测

预测养护海滩动力地貌演变过程的最常用的手段之一就是数学模型,这也是几乎所有海滩养护工程设计阶段需要开展的一项工作。海滩动力地貌演变的数值模拟通常需要同时模拟波浪传播变形、波生流运动、泥沙起动与输运、地形演变等复杂过程。针对实际工程的具体需求,结合所研究的物理过程的时空尺度,数学模型的选择、建立或改进应最大程度上兼顾模型的科学性和实用性。例如,非常精细地计算流体力学模型(Jacobsen *et al.*, 2014)被应用于模拟实验室尺度的短期地形演变,物理过程相对较为完整的 XBeach 模型(Roelvink *et al.*, 2009)常被应用于模拟某一个风暴事件作用下的沙滩侵蚀,而一些降复杂度的简化模型常被应用于模拟几年至几十年尺度上气候变化影响下的岸线演变(Vitousek *et al.*, 2017)。Zheng 等(2014)建立了波浪和波生流共同作用下的海滩剖面演变数学模型 CROSPE,考虑了波浪和底部离岸流的互制输沙机制,先后提出了波浪破碎新指标(Zhang *et al.*, 2021a)、波峰面坡度新公式(Zhang *et al.*, 2017)和波浪反射的高效模拟方法(Zhang *et al.*, 2021b),可较好模拟风暴和常浪条件下的沙坝双向迁移和岸滩侵蚀与恢复,并成功应用于不同补沙粒径和设计形式的海滩养护方案优化、平衡剖面预测和稳定性分析等(陈雅莉, 2015; Li *et al.*, 2021a, 2021b)。

现有的面向工程应用的数学模型仍存在一些不足。例如,此类模型无法精细描述波浪破碎紊动传递效率与破波类型的关系,这决定了近底泥沙悬扬与波浪相位的耦合关系,会影响一个波周期内净输沙率方向与量值的准确模拟。此外,海滩冲流带受到紊动水体的往复冲刷,处于周期性的淹没与暴露过程之中,现有模型仍难以准确描述冲流带内剧烈的泥沙运动与地形演变。虽然许多模型已能较好地模拟和预测风暴作用下的短时间尺度岸滩侵蚀和沙坝迁移过程,但对于大尺度长时间的岸滩恢复过程的模拟,目前仍然是一个很大的挑战。最后,探索海滩水沙运动过程与海滩生态过程的相互作用和耦合模拟,以及与大数据、人工智能和遥感技术的交叉融合,也是今后的重要发展方向。总的来讲,海滩演变数学模型需要在过程精细化和模拟高效化的平衡上取得进一步的突破创新,以适应于海滩养护及管理维护中不断增长的数字

化、智能化和业务化需求。

4 结语

随着我国海岸带保护修复工程的持续推进,海滩养护的工程数量越来越多,实践经验越来越丰富,积累的数据资料也越来越多,有更多的机会结合工程实践来探索和应用一些新兴技术并开展基础研究,在强动力、弱动力、强潮等不同条件下的动力适应性及滩肩、沙坝等地貌稳定性等方面取得了一些新的认识,发展了适应动力地貌环境的海滩养护设计、数字影像监测和数值模拟预测等关键技术,促进了本领域的科技进步和国际显示度,为我国海滩养护工程建设、评估、管理及维护等提供了支撑。面向全球气候变化、砂源紧缺和海岸生态保护修复评估体系多元化等新形势,今后的研究重点包括以下几个方面:(1) 深入研究破波带和冲流带水沙运动机制,加强养护海滩的韧性评估及其优化设计;(2) 开展海滩养护适宜性分区评价及补沙超填精准控制方法等方面的研究,以实现更可持续的海滩养护;(3) 加强不同海滩养护工程措施及阶段对生态环境和生物多样性的影响研究,更好地促进防灾减灾与生态恢复协同增效;(4) 拓展海滩质量评价与管理、海滨浴场游客安全防护及科学普及等方面的研究,探索构建数字孪生海岸,服务海滩智慧管理。

参 考 文 献

- 李元, 2021. 近岸人工沙坝剖面形态演变规律及其水沙运动机制研究[D]. 南京: 河海大学.
- 李方明, 2021. 基于遥感云平台的我国大陆海岸线数据库建立与分析[D]. 南京: 河海大学.
- 杨燕雄, 张甲波, 刘松涛, 2014. 秦皇岛海滩养护工程的实践与方法[J]. 海洋地质前沿, 30(3): 1-15.
- 张弛, 卜鑫涛, 刘建辉, 等, 2022. 考虑水沙和风沙过程的海滩-沙丘系统耦合演变数学模型研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 50(3): 81-90.
- 陆旭, 张弛, 时健, 等, 2021. 我国海滩游客安全事故数据库和事故特征分析[J]. 海洋开发与管理, 38(6): 3-11.
- 陈雅莉, 2015. 非均匀沙海滩剖面演变数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学.
- 林峰竹, 王慧, 张建立, 等, 2015. 中国沿海海岸侵蚀与海平面上升探析[J]. 海洋开发与管理, 32(6): 16-21.
- 徐佳丽, 时健, 张弛, 等, 2019. 近 40 年中国近海波浪数据库的建立及极值分析[J]. 海洋工程, 37(6): 94-103.
- 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等, 2021. 海滩修复养护技术发展趋势与前景[J]. 应用海洋学报, 40(1): 111-125.
- 温昌麒, 朱君, 蔡锋, 等, 2021. 海滩修复工程影响下的低能海岸波浪能量时空分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 52(1): 75-85.

- 解鸣晓, 阳志文, 张义丰, 2017. 海岸整治修复及人工沙滩工程理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社.
- 蔡锋, 刘根, 2019. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. 应用海洋学学报, 38(4): 452-463.
- CAO Z B, ZHANG C, CHI S H, *et al*, 2020. Video-based monitoring of an artificial beach nourishment project [J]. Journal of Coastal Research, 95(S1): 1037-1041.
- CHEN D K, MELVILLE B, ZHENG J H, *et al*, 2022. Pickup rate of non-cohesive sediments in low-velocity flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 60(1): 125-135.
- CHEN D K, ZHENG J H, ZHANG C, *et al*, 2021. Critical shear stress for erosion of sand-mud mixtures and pure mud [J]. Frontiers in Marine Science, 8: 713039. doi: 10.3389/fmars.2021.713039.
- CHI S H, ZHANG C, SUI T T, *et al*, 2021. Field observation of wave overtopping at sea dike using shore-based video images [J]. Journal of Hydrodynamics, 33(4): 657-672.
- DEAN R G, 2003. Beach Nourishment: Theory and Practice [M]. Singapore: World Scientific.
- ELKO N, BRIGGS T R, BENEDET L, *et al*, 2021. A century of U.S. beach nourishment [J]. Ocean & Coastal Management, 199: 105406.
- GUO J L, SHI L Q, CHEN S L, *et al*, 2021. Sand-mud transition dynamics at embayed beaches during a typhoon season in eastern China [J]. Marine Geology, 441: 106633.
- HE Y Y, LIU J H, CAI F, *et al*, 2022. Aeolian sand transport influenced by tide and beachface morphology [J]. Geomorphology, 396: 107987.
- HOONHOUT B, DE VRIES S, 2017. Aeolian sediment supply at a mega nourishment [J]. Coastal Engineering, 123: 11-20.
- JACOBSEN N G, FREDSE J, 2014. Formation and development of a breaker bar under regular waves. Part 2: sediment transport and morphology [J]. Coastal Engineering, 88: 55-68.
- LI Y, ZHANG C, CAI Y, *et al*, 2021a. Wave dissipation and sediment transport patterns during shoreface nourishment towards equilibrium [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 9(5): 535.
- LI Y, ZHANG C, CHEN D K, *et al*, 2021b. Barred beach profile equilibrium investigated with a process-based numerical model [J]. Continental Shelf Research, 222: 104432.
- LI Y, ZHANG C, DAI W Q, *et al*, 2022. Laboratory investigation on morphology response of submerged artificial sandbar and its impact on beach evolution under storm wave condition [J]. Marine Geology, 443: 106668.
- LIU G, CAI F, QI H S, *et al*, 2020. A summary of beach nourishment in China: the past decade of practices [J]. Shore & Beach, 88(3): 65-73.
- LIU G, QI H S, CAI F, *et al*, 2021. Morphodynamic evolution of post-nourishment beach scarps in low-energy and micro-tidal environment [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3): 303.
- LUIJENDIJK A, HAGENAARS G, RANASINGHE R, *et al*, 2018. The state of the world's beaches [J]. Scientific Reports, 8: 6641.
- QI H S, CAI F, LEI G, *et al*, 2010. The response of three main beach types to tropical storms in South China [J]. Marine Geology, 275(1/2/3/4): 244-254.
- ROELVINK D, RENIERS A, VAN DONGEREN A, *et al*, 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands [J]. Coastal Engineering, 56(11/12): 1133-1152.
- SHI J, ZHENG J H, ZHANG C, *et al*, 2019. A 39-year high resolution wave hindcast for the Chinese coast: model validation and wave climate analysis [J]. Ocean Engineering, 183: 224-235.
- SHU F F, CAI F, QI H S, *et al*, 2019. Morphodynamics of an artificial cobble beach in Tianquan Bay, Xiamen, China [J]. Journal of Ocean University of China, 18(4): 868-882.
- STIVE M J F, DE SCHIPPER M A, LUIJENDIJK A P, *et al*, 2013. A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: the sand engine [J]. Journal of Coastal Research, 29(5): 1001-1008.
- VAN BEMMELEN C W T, DE SCHIPPER M A, DARNALL J, *et al*, 2020. Beach scarp dynamics at nourished beaches [J]. Coastal Engineering, 160: 103725.
- VITOUSEK S, BARNARD P L, LIMBER P, *et al*, 2017. A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(4): 782-806.
- VOUSDOUKAS M I, RANASINGHE R, MENTASCHI L, *et al*, 2020. Sandy coastlines under threat of erosion [J]. Nature Climate Change, 10(3): 260-263.
- XIE M X, ZHANG C, LI J Z, *et al*, 2021. Flow structure and bottom friction of the nonlinear turbulent boundary layer under stormy waves [J]. Coastal Engineering, 164: 103811.
- ZHANG C, LI Y, CAI Y, *et al*, 2021a. Parameterization of nearshore wave breaker index [J]. Coastal Engineering, 168: 103914.
- ZHANG C, LI Y, ZHENG J H, *et al*, 2021b. Parametric modelling of nearshore wave reflection [J]. Coastal Engineering, 169: 103978.
- ZHANG C, ZHANG Q Y, ZHENG J H, *et al*, 2017. Parameterization of nearshore wave front slope [J]. Coastal Engineering, 127: 80-87.
- ZHANG C, ZHENG J H, ZHANG J S, 2014. Predictability of wave-induced net sediment transport using the conventional 1DV RANS diffusion model [J]. Geo-Marine Letters, 34(4): 353-364.
- ZHAO S H, QI H S, CAI F, *et al*, 2020. Morphological and sedimentary features of sandy-muddy transitional beaches in estuaries and bays along mesotidal to macrotidal coasts [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 45(7): 1660-1676.
- ZHENG J H, ZHANG C, DEMIRBILEK Z, *et al*, 2014. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 140(2): 146-159.

FUNDAMENTAL THEORY AND KEY TECHNIQUES OF BEACH NOURISHMENT MORPHODYNAMICS: AN OVERVIEW OF RECENT RESEARCH ADVANCES

ZHENG Jin-Hai^{1,3}, ZHANG Chi^{2,3}

(1. *Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract Beach nourishment is one of the most important nature-based solutions for sandy coastal resilience, and one of the most important contents of China's coastal protection and restoration projects. Recent research advances on fundamental theory and key techniques of beach nourishment in China are reviewed, including the dynamic adaptability of beach nourishment under high-energy, low-energy and macro-tidal environments, the morphological stability of beach nourishment with respect to beach berm and sand bar, and the numerical modelling of nourished beach evolution. Further research prospects are also suggested.

Key words beach nourishment; dynamic adaptability; morphological stability; fundamental theory; key techniques