

生态海岸防护工程研究进展与展望*

易雨君¹ 刘奇¹ 王雪原² 季则舟³

(1. 北京师范大学环境学院 北京 100875; 2. 烟台大学土木工程学院 山东烟台 264005; 3. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司 天津 300220)

摘要 海岸防护工程对防止海岸带侵蚀, 维持生态系统完整性和多样性至关重要。传统硬质海堤较少考虑其对海岸带生态环境的影响。随着中国进入生态环境高质量发展新阶段, 对海岸防护工程的生态效应方面提出了更高的要求。目前, 对已建成的硬质海堤进行生态化改造, 或在充分考虑自然条件和防护性能的基础上建设具有保护与维持海岸带生态环境的生态海岸防护工程已是大势所趋。生态海岸防护工程的宗旨是尽可能地维持当地海岸带的自然生态环境, 同时通过削减波浪能量保护海岸带侵蚀。目前关于生态海岸防护工程主要集中在理论和理念方面, 在具体的实施和建设环节, 仍存在建设标准不完善、建设成本过高、缺乏系统持续的监测数据以及生态效应评估不足等问题。因此, 后续应进一步完善我国生态海岸防护工程技术体系, 加强生态海岸防护工程关键技术研发, 建立持续的系统的环境生态监测体系, 并对生态海岸防护工程生态效益进行持续关注 and 评价。

关键词 生态海岸防护工程; 生态海堤; 生态化改造; 消浪

中图分类号 X-1 doi: 10.11693/hyhz20211200315

海岸防护工程是为防御风暴潮(洪)水和波浪对防护区的危害而修筑的工程, 可以有效抵御海岸侵蚀、风暴潮和海平面上升。《全国海堤建设方案》指出, 目前我国已建成的海洋护岸工程主要为海堤, 长度约 1.45 万 km, 约占大陆海岸线 1.8 万 km 的 81%。已建成海堤绝大部分为刚性结构的硬质海堤, 主要为浆灌砌块石、现浇混凝土、预制混凝土块等结构型式(张翠萍等, 2020)。硬质海堤在保护滨海区域不被波浪侵蚀的同时, 也改变了沿岸的水动力条件, 减少了沿海地区的沉积物供应, 最终导致海岸线位置的总体性退移(Coelho *et al.*, 2016), 这也在一定程度上降低了海堤对灾害的防御能力(Day *et al.*, 2007; Törnqvist *et al.*, 2009)。除此之外, 硬质海堤还导致海岸带生物栖息地丧失、改变潮间带生物群落结构(Perkins *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2016)破坏陆地与海洋间的物质交换和生物连通(Winters *et al.*, 2015; van Der Most *et al.*, 2018), 进而致使生物多样性下降(Bulleri *et al.*, 2010; Lai *et al.*, 2015)。与天然海岸线相比, 硬质海堤支持的

生物多样性和丰度分别减少 23%和 45% (Gittman *et al.*, 2016)。硬质海堤对近海水动力条件的改变可能会使水体交换能力下降, 导致陆源污染物积累和水体富营养化(崔力拓等, 2014; Landry *et al.*, 2018)。

为解决硬质海洋护岸工程带来的问题, 建设生态型海岸防护工程势在必行。实际上, 早在 20 世纪初, 张謇等的《开垦海门荒滩奏略》提出因地制宜地进行荒滩的开垦与生态海堤的建设(李婷等, 2015), 体现了我国生态文明和生态海堤这一思想的雏形。1978 年江苏省灌云县燕尾港海堤通过在潮间带栽种互花米草的方式保证了迎水滩面不受冲刷和海堤工程稳定(张宏谟, 1987), 这是我国首次对海堤进行生态化改造, 取得了较好的效果, 但随后几十年鲜有针对生态海堤方面深入和系统性的研究及应用。近年来, 随着社会经济的发展和对环境生态的重视关注程度的提高。2017 年 8 月《全国海堤建设方案》提出注重生态, 落实绿色发展理念。妥善处理海堤建设和海岸生态环境保护的关系, 尽可能维护海岸自然形态。

* 国家杰出青年科学基金项目, 52025092 号; 北京市杰出青年基金项目, JQ19034 号。易雨君, 博士生导师, 教授, E-mail: yiyujun@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-12-08, 收修改稿日期: 2022-02-06

2020年1月《围填海工程海堤生态化建设标准》提出了在保障海堤的防灾减灾安全功能要求的基础上,以恢复海岸的生态功能为目标,减缓人类在海堤建设过程中对海域生态系统的负面影响,以及秉持生态保护、因地制宜的理念,根据区域地质地貌特点、水文动力条件、气候特征,采用不同的结构、材料对海堤进行科学设计的建设原则。2021年4月《2020年中国海平面公报》提出强化海岸带生态防护与保护修复。加强基于生态理念的海岸防护,推进海堤的生态化改造。因此,在充分考虑自然条件和防护性能的基础上,建设具有生态功能,保护与维持海岸带生态环境的生态海岸防护工程以及对已建成的硬质海堤进行生态化改造具有重要的现实意义。随着国家对海洋生态文明建设的重视与未来对建设用海的生态建设的需求,亟需对生态海岸防护工程的建设系统的理论指导和准确的科学依据。

1 堤前生态系统对消浪的贡献

生态海岸防护工程在潮间带维持的堤前生态系统,不仅具有生态功能,也具有减小波浪能量和保护海堤的作用。相关的堤前生态系统主要有盐沼湿地、红树林和生物礁(珊瑚礁、牡蛎礁等)。盐沼湿地主要分布在温带海岸,以盐生草本植物为优势生物群落。红树林主要生长于热带和亚热带海岸,是陆地向海洋过渡的特殊生态系统,以乔木、小乔木、灌木为主(林鹏,2001)。生物礁在热带以珊瑚礁为典型,珊瑚生活在水体清澈、波浪作用为主的热带区域,形成的珊瑚礁能够很好地抵抗波浪的侵蚀作用;而在水温偏低的中纬度地区,以牡蛎礁最为常见(Wang *et al.*, 1997),贻贝和藤壶等也可形成小规模礁体(Wang *et al.*, 1997)。

作为植被-波浪相互作用研究领域的一部分,对盐沼湿地中植被消浪作用的研究众多,包括通过理论分析、现场观测、物理模型和数值模拟等方法探讨波浪运动进入盐沼湿地之后的过程。盐沼湿地通常生长在泥沙堆积的地方,水深较浅,海水流速降低,砂质沉积物难以起动。除此之外,盐沼湿地中的植株提高了水体的紊动能耗散,减小了过水断面面积,部分动能由于壅水而转换为势能,导致了流速进一步下降,且当风暴潮发生时,植株对减缓流速、促进悬浮物沉降的作用更加显著(Möller *et al.*, 1999; Temmerman *et al.*, 2005; Neumeier *et al.*, 2006; 王爱军等, 2008; Möller *et al.*, 2014); 同时,沉水植被在波浪条件下产生的紊动能也可能促进沉积物的再悬浮(易

雨君等, 2020),植物对波能耗散和产生紊流的双重影响需要进一步进行研究和计算。植株的茎秆和叶片在水流中并非固定不动,而是会随水流方向发生摆动(Mullarney *et al.*, 2010),与模拟固定状态植株的波能耗散相比,考虑摆动因素之后的计算结果更加符合实际(Riffe *et al.*, 2011)。植株的高度也是重要的影响因素,在纽约 Jamaica 湾互花米草滩对风暴波浪能耗散的计算中发现,较高的互花米草植株发挥了最大的消能作用(Marsooli *et al.*, 2017)。

由于红树林植株比盐沼植株要高大得多,在垂直方向上由树冠、树干和根系三个部分组成,但消浪作用的方式与盐沼湿地相似。与裸滩或盐沼湿地水流的垂直结构相比,红树林以不同的方式影响水流在垂向上的流速分布(Chang *et al.*, 2019)。随着红树林植株密度的上升,红树林产生的波能耗散也随之上升(Horstman *et al.*, 2014)。红树林主要以增加水流的摩擦和破碎波浪的方式消耗波能,而且根系对波能的反射也是不可忽视的消浪方式(Sánchez-Núñez *et al.*, 2020)。在风暴中,红树林的消浪作用比平时更加显著,且与树冠和树干相比,此时根系也发挥了更大的消浪作用(Lee *et al.*, 2021)。

生物礁一般分布于海岸线的前缘,易受波浪冲击,同时也导致波浪破碎。波能在珊瑚礁中的耗散主要是通过水流与珊瑚礁的摩擦(Lentz *et al.*, 2016),珊瑚礁表面产生的摩擦阻力系数可达 0.3,一般情况下能耗散约 80%的波能,在风暴期间波能耗散率约 25%~80%(Osorio-Cano *et al.*, 2019)。当温带地区水温过低时则不适宜珊瑚的生长。温带规模较大的生物礁以牡蛎礁为主,其规模远不及珊瑚礁,形态也有所不同。对人工繁殖的牡蛎礁进行的实验表明,高出海底 0.6 m 的牡蛎礁能够有效阻挡波高小于 0.5 m 的波浪(Chowdhury *et al.*, 2019)。牡蛎礁对波浪的耗散取决于包括礁石结构、水深和波浪类型(以涌浪为主或以风浪为主)(Zhu *et al.*, 2020)等在内的多种因素。

2 生态海岸防护工程建设实践

近几十年来,随着对传统硬质海堤对沿海环境潜在不利影响认识的加深,越来越多的海洋护岸工程开始考虑对环境与生态的保护。植物、石头、沙子等自然材料被用来建设生态护岸来控制海岸线的侵蚀(O'Donnell, 2017)。美国得克萨斯州的一处海岸线采用植被和人工抛石相结合的方式,使用当地原生材料进行加固,花费仅为典型硬质海堤的三分之一

(Jones *et al.*, 2004), 且生态海岸防护工程在应对风暴潮对海岸侵蚀的表现比硬质海堤和自然滩涂更好 (Smith *et al.*, 2018)。不同于传统硬质海堤, 生态海岸防护工程存在多种形式, 可分为仅使用自然结构与材料对岸滩进行保护的工程, 完全取消传统海堤的模式; 或在传统海堤前或海堤迎潮面上建设与维持具有生态功能的混合结构。前者仅使用如盐沼湿地、红树林、牡蛎礁、沙滩与珊瑚礁等生态结构进行建设 (图 1a), 例如荷兰 Dollard 地区的“Wide Green Dikes”即由坡度极缓的草地和盐沼湿地构成的坡面, 具有较好的生态性能和较低的成本, 且具有易于维修、适应性更强、空间质量更高的特点 (Van Loon-Steensma *et al.*, 2017), 但是仅使用自然结构与材料建设的护岸工程相较于其他方法需要更大的建设空间与长时间的天然生长, 在一定程度上限制了该方法的适用范围; 相较于前者, 混合结构海堤将天然生态材料与传统硬质海堤建设相结合以减少硬质海堤建设成本与负面生态影响, 且相较于仅使用自然结构与材料建设的护岸工程, 具有占地面积小的优势, 例如在海堤前由消浪潜堤, 牡蛎基床和盐沼湿地构成的复合式生态消浪结构 (Sutton-Grier *et al.*, 2015, 图 1b), 但是混合结构仍然会对当地的生态环境造成一定的负面影响且需要更加精细的设计, 这在一定程度上提高了建设成本。国内的生态海岸防护工程主要选择后者, 即在建设和维持传统硬质海堤防灾防侵蚀功能基础上增设生态结构, 如防城港西湾红沙环海堤工程通过人工鱼礁建设、滨海滩涂湿地红树林恢复和硬化堤岸的生态化改造改善海岸生境 (潘丹等, 2014); 广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设工程在海堤前条件较好的光滩上人工种植红树林和在硬质坡面上进行生态化改造以形成生态堤岸 (李丽凤等, 2019); 粤港澳大湾区南沙新区万顷沙联围海堤加固工程通过在堤前结合消浪防护规划红树林种植区, 在堤后建设生态景观的方式建设生态海堤 (吴欢强等, 2019); 宁德市三屿工业区围填海工程结合海堤安全要求, 东堤堤前带采取在潮间带区域适当放置碎石等措施, 通过营造潮汐池等生境, 增加海洋生物栖息地和庇护所。南堤堤前带主要结合堤前滩涂湿地, 种植红树林、芦苇等, 促进河口湿地生态修复 (欧阳玉蓉等, 2021); 南沙新区灵山岛尖南段海岸及滨海景观带建设工程利用原有抛石为基底, 铺设植生袋、土工蜂巢框格等结构构建堤脚滩涂生态带, 并且首次运用新型“自嵌式瓶孔砖”建设迎水带护坡 (陈俊昂等, 2021)。

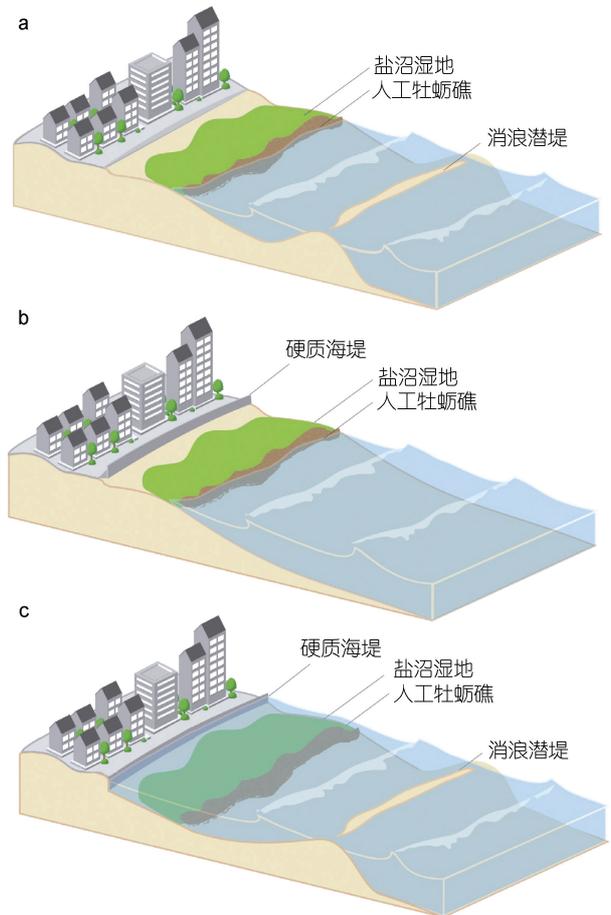


图 1 生态海岸防护工程示意图 (修改自 Sutton-Grier *et al.*, 2015)

Fig. 1 Schematic of ecological coastal infrastructure (modified from Sutton-Grier *et al.*, 2015)

注: a. 仅使用自然结构与材料对岸滩进行保护的工程; b. 将天然生态材料与传统硬质海堤建设相结合的混合结构海堤; c. 进行生态化改造的传统硬质海堤

3 对已有海堤的生态化改造

对于已经建成的硬质海堤, 在条件允许的情况下可以进行生态化改造。海堤应参照当地的自然栖息地进行改造 (Schoonees *et al.*, 2019; 图 1c)。通过增加硬化海堤表面结构的复杂性, 可以增强滨海湿地生境异质性 (Airoldi *et al.*, 2005; Borsje *et al.*, 2011; Firth *et al.*, 2016; Hall *et al.*, 2018), 为生物创造更多的栖息地 (Cousins *et al.*, 2017), 有助于降低硬质海堤对滨海湿地生态系统产生的不利影响, 提高滨海湿地生物的多样性和丰富度。不同的生态结构 (如纹理、裂缝、凹坑、潮间带蓄水结构等) 对生物多样性的影响在不同种群间存在差异, 且个体尺寸大小与某种生态结构接近的群落有最大的正相关性 (Strain *et al.*, 2018)。硬化海岸表面结构越复杂, 生物的丰富度越高, 而且

不同的表面结构类型对生物的丰富度和群落结构的影响不同(Loke *et al.*, 2016), 不同尺寸的表面结构也会影响生物的丰富度和群落结构(Loke *et al.*, 2017)。加拿大温哥华会议中心设计了以混凝土台阶构成的海堤阶梯, 在泥沙沉积后有效地增加了浅水栖息地面积(Dyson *et al.*, 2015); 澳大利亚 Townsville 的海堤通过放置廉价的人工花箱作为海洋生物的栖息地(Waltham *et al.*, 2018); 悉尼港修建海堤时通过在海堤上预留缺口的方式制造人工栖息地, 后续研究发现人工栖息地中物种多样性高于附近的自然栖息地(Chapman *et al.*, 2009); 对以色列海法港具有生态设计的混凝土结构物进行的研究表明, 结构物及其周围的无脊椎动物和鱼类的丰度、丰富度和多样性更高, 而入侵物种的比例则要低得多(Ido *et al.*, 2015); 宁德三屿围垦工程海堤安全生态提级改造过程中, 通过增加护脚石块的孔隙率为海洋生物提供栖息地, 并在去除入侵的互花米草的滩涂上种植芦苇和秋茄以实现消波、促淤、固堤的效果(胡志英, 2020)。

4 国内生态海岸防护工程存在的问题

生态海岸防护工程已引起了广泛关注, 但目前针对生态海岸防护工程的报道主要集中于工程建设, 对于已建成护岸工程的生态效果则较少跟踪。同时, 由于不同地区的海岸带生态环境具有较强的地域性, 导致生态海岸防护工程的建设和对已有海堤的生态化改造均难以建立统一的标准, 且在建设后对生态恢复情况缺乏系统持续的监测与可量化的评价体系。

4.1 生态海岸防护工程的建设标准不够完善

目前, 生态海岸防护工程的建设没有可以遵循的统一标准, 在实践中的表现为生态海岸防护工程的规划、设计和施工等环节由于缺乏指导往往各行其是。虽然 2020 年出台了《围填海工程海堤生态化建设标准》(T/CAOE 1-2020), 但该标准属于团体标准, 且主要针对围填海工程新建海堤的生态化建设, 而既有海堤的生态化改造只能参照适用。其中的一个问题是在某些生态海岸防护工程的建设过程与硬质海堤的生态化改造过程中, 将海堤的绿化等同于生态化, 比如堤顶的生态景观改造、堤后坡的生态绿化种植措施等。但对于海堤迎潮面和潮间带等区域, 生态改造的设计和实施却较为谨慎, 可能的原因是海堤迎潮面和潮间带等区域会受到波浪直接作用, 已完成的生态改造可能会随着波浪的侵蚀逐渐消失, 被海浪破坏后的生态结构甚至可能对海堤本身造成影

响。但这种保守的生态改造手段与恢复海岸的生态功能, 减缓人类在海堤建设过程中对海域生态系统的负面影响这一根本目标相违背。陈振华等(2020)提出《围填海工程海堤生态化建设标准》对迎海侧护坡“空隙率不低于 40%”与“生态材料护面表面积占比不低于 30%”的规定存在矛盾, 且“生态材料护面表面积占比不低于 30%”的标准偏低。原因是“生态材料”定义过于宽泛, 如异型消浪块体, 散抛块石、抛理大块石、干砌块石、插砌条石等, 在建设时只要留有空隙均可被视为“生态材料”。

4.2 生态海岸防护工程建设成本居高不下

对防城港市西湾红沙环生态海堤整治创新示范工程项目的后续研究表明, 生态海堤的建设成本相较于传统硬质海堤高出 50%~100%, 设置的生态海堤功能区块被采纳并实施的比例仅为 40%, 规划推荐树种仅被采用 15.16% (范航清等, 2017)。造成这种情况的主要原因是生态海岸防护工程需要在海堤迎潮面或潮间带等区域采用价格更高的生态结构、养护人工沙滩或种植红树林等手段维持海岸生态环境, 提高了建设和维护成本。另外, 国内的生态海岸防护工程建设的通常理念是首先满足海堤防灾和护岸的功能, 在此基础上再为海堤增加生态功能, 而并未将盐沼湿地、红树林或牡蛎礁等生态结构在减小波浪能量和保护海堤上的作用纳入考虑。若能统筹生态结构和海堤主体的消浪能力, 则可以降低海堤的设计和建造标准, 最终降低护岸工程的整体成本。

4.3 缺乏系统持续的监测数据

生态海岸防护工程的建设硬质海堤的生态化改造必须掌握当地的水文水动力条件和环境地貌等数据; 堤前生态结构的构建必须通过实地调研获得当地海岸带生态环境的数据与资料, 如植物、藻类、潮间带生物、鱼类等的种群密度与分布情况; 为了维持堤前生态系统的物质交换和能量流动, 也需要测定氮磷等水质指标和温度等环境指标; 工程的生态化建设和改造效果评估也需要后期掌握生态结构的消浪作用、生态系统恢复情况和海堤安全与防灾减灾情况等综合数据。然而相关数据由不同部门进行监测、管理, 存在数据时间尺度上不匹配, 时间序列不一致等问题。

4.4 工程生态效益评估不足

在工程验收后缺乏后期跟踪监测与评估, 导致长时间序列数据缺失, 难以对生态海岸防护工程的设计和性能进行评估与研判, 表现为缺乏对已实施

的生态海岸防护工程进行后期监测和评估的同行评审报告文献,无法提供可以参考的信息,给后续的生态海岸防护工程设计与建设带来了困难。尤其是目前国内对于生态海岸防护建设与硬质护岸生态化改造后的生态恢复情况未见报道。可能原因是生态系统的恢复需要较长时间,无法在工程结束时进行审核;且生态海岸防护的建设或改造项目以工程设计与建设部门为主导,较少有生态或环境相关部门参与。

5 展望

生态海岸防护工程建设是一个跨学科合作的新生事物,目前仍处于探索阶段,在规划、设计与施工各环节中仍有许多可以改进之处。针对我国生态海岸防护工程的现状和未来需求,可以从以下几点对生态海岸防护工程的建设进行完善:

(1) 依据我国海岸带水文水动力环境特点和生态系统特点,综合规划适合我国国情的生态海岸防护工程技术体系,规范设计标准、建设标准、验收标准,对生态海岸防护工程的建设进行科学指导;

(2) 持续加强生态海岸防护工程建设关键技术研发,深入研究生态海岸防护工程建设的规划、设计、施工、生态材料、后期监测评估以及维护技术,构建适合我国海岸带水文水动力与生态环境特点的生态海岸防护工程建设模式;

(3) 我国海岸线漫长,类型众多,应因地制宜确定工程方案,如尽量保持淤泥质海岸冲淤平衡,建设潜堤、丁坝等措施消浪促淤;人工养护沙滩,在潮下带设置珊瑚礁或牡蛎礁对沙滩进行保护;人工种植盐沼湿地植被或红树林等,尽可能恢复工程前的海岸带状态。

(4) 探索生态海岸防护工程可采用的多样化生态修复方式,由于工程建设和建设后的生态恢复是漫长和持续到过程,因此需要对工程所在海域的水文、水动力、水质和海岸带生态系统等信息在建设前进行充分调查,并在建设中和建设后直到生态系统恢复稳定状态期间构建长期的现场调查监测机制,对生态海岸防护工程建设对生态环境的影响进行持续研究,为后续的生态海岸防护工程建设提供理论指导和数据支撑。

参 考 文 献

王爱军,高抒,陈坚,等,2008.福建泉州湾盐沼对台风“格美”的沉积动力响应[J].科学通报,53(22):2814-2823.

- 李丽凤,刘文爱,蔡双娇,等,2019.广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设模式研究[J].湿地科学,17(3):277-285.
- 李婷,陈晗,2015.张謇的生态建设之一瞥[J].中国生态文明(1):86-89.
- 吴欢强,李远辉,2019.万顷沙联围海堤加固工程生态设计[J].广东水利水电(6):23-27.
- 张宏谟,1987.工程措施与种大米草结合的海堤防护[J].江苏水利(4):41.
- 张翠萍,贾后磊,吴玲玲,等,2020.海堤生态化建设技术的研究进展及推进我国海堤生态化建设的建议[J].海洋开发与管理,37(9):57-61.
- 陈俊昂,王帅,钟兴,等,2021.“多功能生态海堤构架体系”技术应用实践[J].广东水利水电(4):56-59,78.
- 陈振华,臧振涛,许沿,2020.低成本的海堤迎潮面护面结构生态化改造方法探讨[J].浙江水利科技,48(4):80-85.
- 范航清,何斌源,王欣,等,2017.生态海堤理念与实践[J].广西科学,24(5):427-434,440.
- 林鹏,2001.中国红树林研究进展[J].厦门大学学报(自然科学版),40(2):592-603.
- 欧阳玉蓉,蔡灵,李青生,等,2021.大型围填海工程海洋生态修复实践与探索[J].海洋开发与管理,38(9):74-79.
- 易雨君,唐彩红,张尚弘,2020.波浪条件下刚性植被茎干紊流对沉积物再悬浮的促进作用[J].湖泊科学,32(6):1827-1836.
- 胡志英,2020.宁德三屿围垦工程海堤安全生态提级改造技术探讨[J].福建水力发电(1):3-6.
- 崔力拓,李志伟,2014.河北省沿海开发活动的生态环境效应评估[J].应用生态学报,25(7):2063-2070.
- 潘丹,曾嵘,2014.城市生态景观型海堤岸带工程建设初探——以防城港西湾红沙环海堤工程规划为例[J].林业科技开发,28(2):135-138.
- AIROLDI L, ABBIATI M, BECK M W, *et al*, 2005. An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures [J]. Coastal Engineering, 52(10/11): 1073-1087.
- BORSJE B W, VAN WESENBEECK B K, DEKKER F, *et al*, 2011. How ecological engineering can serve in coastal protection [J]. Ecological Engineering, 37(2): 113-122.
- BULLERI F, CHAPMAN M G, 2010. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments [J]. Journal of Applied Ecology, 47(1): 26-35.
- CHANG Y, CHEN Y N, LI Y, 2019. Flow modification associated with mangrove trees in a macro-tidal flat, southern China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 38(2): 1-10.
- CHAPMAN M G, BLOCKLEY D J, 2009. Engineering novel habitats on urban infrastructure to increase intertidal biodiversity [J]. Oecologia, 161(3): 625-635.
- CHOWDHURY M S N, WALLEES B, SHARIFUZZAMAN S M, *et al*, 2019. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast [J]. Scientific Reports, 9(1): 8549.
- COELHO C, CRUZ T, ROEBELING P, 2016. Longitudinal revetments to mitigate overtopping and flooding: effectiveness,

- costs and benefits [J]. *Ocean & Coastal Management*, 134: 93-102.
- COUSINS L J, COUSINS M S, GARDINER T, *et al*, 2017. Factors influencing the initial establishment of salt marsh vegetation on engineered sea wall terraces in south east England [J]. *Ocean & Coastal Management*, 143: 96-104.
- DAY J W JR, BOESCH D F, CLAIRAIN E J, *et al*, 2007. Restoration of the Mississippi delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita [J]. *Science*, 315(5819): 1679-1684.
- DONG Y W, HUANG X W, WANG W, *et al*, 2016. The marine 'great wall' of China: local- and broad-scale ecological impacts of coastal infrastructure on intertidal macrobenthic communities [J]. *Diversity and Distributions*, 22(7): 731-744.
- DYSON K, YOCOM K, 2015. Ecological design for urban waterfronts [J]. *Urban Ecosystems*, 18(1): 189-208.
- FIRTH L B, KNIGHTS A M, BRIDGER D, *et al*, 2016. Ocean sprawl: challenges and opportunities for biodiversity management in a changing world [J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 54: 189-262.
- GITTMAN R K, SCYPHERS S B, SMITH C S, *et al*, 2016. Ecological consequences of shoreline hardening: a meta-analysis [J]. *BioScience*, 66(9): 763-773.
- HALL A E, HERBERT R J H, BRITTON J R, *et al*, 2018. Ecological enhancement techniques to improve habitat heterogeneity on coastal defence structures [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 210: 68-78.
- HORSTMAN E M, DOHMEN-JANSSEN C M, NARRA P M F, *et al*, 2014. Wave attenuation in mangroves: a quantitative approach to field observations [J]. *Coastal Engineering*, 94: 47-62.
- IDO S, SHIMRIT P F, 2015. Blue is the new green - Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure [J]. *Ecological Engineering*, 84: 260-272.
- JONES K, HANNA E, 2004. Design and implementation of an ecological engineering approach to coastal restoration at Loyola Beach, Kleberg County, Texas [J]. *Ecological Engineering*, 22(4/5): 249-261.
- LAI S, LOKE L H L, HILTON M J, *et al*, 2015. The effects of urbanisation on coastal habitats and the potential for ecological engineering: a Singapore case study [J]. *Ocean & Coastal Management*, 103: 78-85.
- LANDRY J B, GOLDEN R R, 2018. In situ effects of shoreline type and watershed land use on submerged aquatic vegetation habitat quality in the Chesapeake and mid-Atlantic coastal bays [J]. *Estuaries and Coasts*, 41(1): 101-113.
- LEE W K, TAY S H X, OOI S K, *et al*, 2021. Potential short wave attenuation function of disturbed mangroves [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 248: 106747.
- LENTZ S J, CHURCHILL J H, DAVIS K A, *et al*, 2016. Surface gravity wave transformation across a platform coral reef in the Red Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1): 693-705.
- LOKE L H L, BOUMA T J, TODD P A, 2017. The effects of manipulating microhabitat size and variability on tropical seawall biodiversity: field and flume experiments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 492: 113-120.
- LOKE L H L, TODD P A, 2016. Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area [J]. *Ecology*, 97(2): 383-393.
- MARSOOLI R, ORTON P M, MELLOR G, *et al*, 2017. A coupled circulation-wave model for numerical simulation of storm tides and waves [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(7): 1449-1467.
- MÖLLER I, KUDELLA M, RUPPRECHT F, *et al*, 2014. Addendum: wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions [J]. *Nature Geoscience*, 7(11): 848.
- MÖLLER I, SPENCER T, FRENCH J R, *et al*, 1999. Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modelling study from north Norfolk, England [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(3): 411-426.
- MULLARNEY J C, HENDERSON S M, 2010. Wave-forced motion of submerged single-stem vegetation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12): C12061.
- NEUMEIER U R S, AMOS C L, 2006. The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes [J]. *Sedimentology*, 53(2): 259-277.
- O'DONNELL J E D, 2017. Living shorelines: a review of literature relevant to new england coasts [J]. *Journal of Coastal Research*, 33(2): 435-451.
- OSORIO-CANO J D, OSORIO A F, ALCÉRRECA-HUERTA J C, *et al*, 2019. Drag and inertia forces on a branched coral colony of *Acropora palmata* [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 88: 31-47.
- PERKINS M J, NG T P T, DUDGEON D, *et al*, 2015. Conserving intertidal habitats: what is the potential of ecological engineering to mitigate impacts of coastal structures? [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167: 504-515.
- RIFFE K C, HENDERSON S M, MULLARNEY J C, 2011. Wave dissipation by flexible vegetation [J]. *Geophysical Research Letters*, 38(18): L18607.
- SÁNCHEZ-NÚÑEZ D A, PINEDA J E M, OSORIO A F, 2020. From local-to global-scale control factors of wave attenuation in mangrove environments and the role of indirect mangrove wave attenuation [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 245: 106926.
- SCHOONEES T, MANCHEÑO A G, SCHERES B, *et al*, 2019. Hard structures for coastal protection, towards greener designs [J]. *Estuaries and Coasts*, 42(7): 1709-1729.
- SMITH C S, PUCKETT B, GITTMAN R K, *et al*, 2018. Living shorelines enhanced the resilience of saltmarshes to Hurricane Matthew (2016) [J]. *Ecological Applications*, 28(4): 871-877.
- STRAIN E M A, OLABARRIA C, MAYER-PINTO M, *et al*, 2018. Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: which interventions have the greatest

- ecological benefit? [J]. *Journal of Applied Ecology*, 55(1): 426-441.
- SUTTON-GRIER A E, WOWK K, BAMFORD H, 2015. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems [J]. *Environmental Science & Policy*, 51: 137-148.
- TEMMERMAN S, BOUMA T J, GOVERS G, *et al*, 2005. Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: three-dimensional modeling for a tidal marsh [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F4): F04019.
- TÖRNQVIST T E, MEFFERT D J, 2009. Erratum: sustaining coastal urban ecosystems [J]. *Nature Geoscience*, 2(1): 16.
- VAN DER MOST M, HUDSON P F, 2018. The influence of floodplain geomorphology and hydrologic connectivity on alligator gar (*Atractosteus spatula*) habitat along the embanked floodplain of the Lower Mississippi River [J]. *Geomorphology*, 302: 62-75.
- VAN LOON-STEENSMA J M, SCHELFHOUT H A, 2017. Wide Green Dikes: a sustainable adaptation option with benefits for both nature and landscape values? [J]. *Land Use Policy*, 63: 528-538.
- WALTHAM N J, SHEAVES M, 2018. Eco-engineering rock pools to a seawall in a tropical estuary: microhabitat features and fine sediment accumulation [J]. *Ecological Engineering*, 120: 631-636.
- WANG H, VAN STRYDONCK M, 1997. Chronology of Holocene cheniers and oyster reefs on the coast of Bohai Bay, China [J]. *Quaternary Research*, 47(2): 192-205.
- WINTERS J M, AVERY H W, STANDORA E A, *et al*, 2015. Between the bay and a hard place: altered diamondback terrapin nesting movements demonstrate the effects of coastal barriers upon estuarine wildlife [J]. *Journal of Wildlife Management*, 79(4): 682-688.
- ZHU L, CHEN Q, WANG H Q, *et al*, 2020. Field observations of wind waves in upper delaware bay with living shorelines [J]. *Estuaries and Coasts*, 43(4): 739-755.

COASTAL ECOLOGICAL INFRASTRUCTURE: RESEARCH PROGRESS AND PROSPECT

YI Yu-Jun¹, LIU Qi¹, WANG Xue-Yuan², JI Ze-Zhou³

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 3. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China)

Abstract Coastal protection infrastructure plays a pivotal role in preventing erosion and protecting the integrity and diversity of the coastal ecosystem. Construction of traditional hard seawalls often neglects the influence on the coastal ecological environment. As China enters a new stage of high-quality development of ecological environment, the ecological efforts of the coastal protection infrastructure are required. At present, ecological enhancement of existing traditional hard seawalls and new construction of ecological infrastructure become a trend of development. Coastal ecological infrastructure could maintain the natural coastal ecological environment, and protect coastal ecosystem via reducing wave energy. Many theoretical studies of coastal ecological infrastructure have been reported. However, in China, concrete issues of imperfect construction standards, high costs, lack of systematic monitoring data, and subsequent evaluation of ecological restoration remain to be solved. Therefore, the engineering technology system of coastal ecological infrastructure suitable for China-specific conditions should be improved, the research of key technologies for coastal ecological infrastructure should be enhanced, a long-term on-site ecological monitoring mechanism should be established, and the long-term influence of the coastal ecological infrastructure should be concerned and evaluated.

Key words coastal ecological infrastructure; ecological seawall; ecological enhancement; wave dissipation