



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

硬质海岸防护设施的生态效应与对策

解成杰, 谢湑, 刘泽正, 于淑玲, 王青, 崔保山

引用本文:

解成杰, 谢, 刘泽正, 等. 硬质海岸防护设施的生态效应与对策[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 461–468.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 484–492 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展

栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 史丹, 徐丹丹, 刘彬, 王立波, 安玉亭

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 469–476 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0124>

基于物质质量的滨海湿地生态补偿理论研究及政策建议

于淑玲, 崔保山, 白军红, 解成杰

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 453–460 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0119>

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于淼, 杨继松, 战超, 周迪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

铁矿生态修复区生态系统服务价值增量评估

叶尔纳尔·胡马尔汗, 马伟波, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 方颖, 李海东

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 594–600 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0197>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

解成杰, 谢 湑, 刘泽正, 等. 硬质海岸防护设施的生态效应与对策[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 461–468.

XIE Cheng-jie, XIE Tian, LIU Ze-zheng, et al. Ecological effect and countermeasures of hardening coastal defense[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 461–468.



开放科学 OSID

硬质海岸防护设施的生态效应与对策

解成杰^{1,2}, 谢 湑^{1,2}, 刘泽正^{1,2}, 于淑玲^{1,2}, 王 青^{1,2}, 崔保山^{1,2*}

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 黄河口湿地生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 东营 257500)

摘 要:虽然滨海地区占地球陆地面积不足4%,但沿海生境是全球最有价值的自然资源之一。世界上超过三分之一的人口生活在距海岸线100 km的范围内。气候变化和人类活动使得全球海岸侵蚀和风暴潮威胁加重。海岸防护可以有效抵御海岸侵蚀、风暴风险和海平面上升。本文概述了全球主要沿海国家和地区(欧盟、美国、中国)海岸硬化情况以及海岸硬化带来的生态效应。欧洲海岸线硬化比例为10%(2006年),美国海岸的硬化比例为14%(2015年),而中国海岸线的硬化比例近60%(2014年)。海岸硬化会引起滨海湿地重要物理、化学和生物过程的变化,生境丧失和破碎化,以及生物连通性的改变。增加硬化设施的结构复杂性或由混合型海岸代替传统硬化海岸可以减轻海岸硬化对滨海湿地生态系统的威胁,但对硬质海岸和混合型海岸的生态服务功能以及抵御风暴能力的评估还比较缺乏,有待进一步研究。

关键词:滨海湿地;人工岸线;硬化类型;海岸防护类型;混合型海岸;生物连通

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)04-0461-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0112

Ecological effect and countermeasures of hardening coastal defense

XIE Cheng-jie^{1,2}, XIE Tian^{1,2}, LIU Ze-zheng^{1,2}, YU Shu-ling^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, CUI Bao-shan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Yellow River Estuary Wetland Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Dongying 257500, China)

Abstract: Although coastal areas account for less than 4% of the earth's land area, coastal habitats are one of the world's most valuable natural resources. Over one-third of the human population lives within 100 km of the coastline. Climate change and human activities exacerbate the global threat of coastal erosion and storm surges. Coastal protection is effective against coastal erosion, storm risk, and sea level rise. This paper summarized the coastal hardening conducted in major coastal regions of the world (EU, USA, and China) and the main ecological effects of coastal hardening. Ten percent of Europe's coastline was hardened by 2006, approximately 14% of the total US coastline had been armored by 2015, and nearly 60% of China's coastline was hardened by 2014. Shoreline hardening can lead to a series of changes in coastal wetlands, such as obstruction of important physical, chemical, and biological processes, habitat loss and fragmentation; and changes in biological connectivity. Increasing the structural complexity of hardening facilities and replacing traditional hardened defense with a hybrid coastal defense can reduce the threat of coastal hardening to coastal wetland ecosystems. However, the assessment of ecological service function and storm resistance of hardening defenses and hybrid coastal defenses is still lacking and needs to be further studied.

Keywords: coastal wetlands; artificial shoreline; hardening structure types; coastal defense types; hybrid coastal defense; biological connectivity

收稿日期: 2019-03-05 录用日期: 2019-04-17

作者简介: 解成杰(1988—),男,山西长治人,博士研究生,从事湿地生态环境研究。E-mail: hexchjie@126.com

*通信作者: 崔保山 E-mail: cuibs@bnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1901212, 51639001); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51721093); 中央高校基本科研业务费专项; 北京师范大学学科交叉建设项目

Project supported: Key Project of National Natural Science Foundation of China(U1901212, 51639001); The Fund for Innovative Research Group of the National Natural Science Foundation of China(51721093); The Fundamental Research Funds for the Central Universities; The Interdiscipline Research Funds of Beijing Normal University

1 海岸硬化概况

相比于自然过程的改变,人类活动正在以前所未有的速度改变着周围的环境^[1-2]。世界滨海湿地面积占全球面积不足4%,然而超过三分之一的世界人口生活在距海岸线100 km的范围内^[3]。随着沿海人口的增长和经济的繁荣,越来越多的滨海基础设施正在扩建,以支持商业、居民和旅游业的持续发展^[4]。这些设施的建设导致沿海生态系统的严重退化或直接丧失,加之海平面上升,使得海岸侵蚀加重,沿海洪水灾害频繁发生。据估计,世界上至少有70%的海滩正在发生侵蚀或泥沙的收支为负^[5]。预计到2100年,全球每年多达4.6%的人口将会遭受洪水灾害^[6]。用“硬”的工程结构(如海堤)武装海岸,可以有效地防治海岸侵蚀,降低洪灾的发生几率^[2]。从历史上看,海岸线硬化一直是抵御海岸侵蚀、风暴风险和海平面上升的有效设施,尤其是在工业比较发达的荷兰、美国和日本等沿海人口众多的国家^[7]。

欧洲许多国家将首都建立在海岸或海岸附近,总共有280个沿海城市。20世纪90年代,大约2亿人生活在距沿海水域50 km之内^[8]。尤其在地中海沿岸(地球上人口最稠密的地区之一),每千米海岸线有5 700~6 600人(统计于2000年)。人口的增长和沿海经济的发展使得欧洲沿海生境逐渐丧失或严重退化。据EEA报告,沿海地区22 000 km²被混凝土或沥青覆盖,仅1990—2000年人工面积就增加了近1 900 km²,欧洲海岸线总长为325 892 km,约25%的海岸线受到侵蚀,10%的海岸线已经人工化^[9]。考虑到近年来的开发力度,目前欧盟人工海岸线的比例会继续增加。

美国海岸辽阔,海岸线总长为160 168 km^[3],坐落于海岸线上的州(县)总共有254个(其中位于大西洋海岸有129个,墨西哥湾有56个,太平洋沿岸有69个),占陆地总面积不足10%(不包括阿拉斯加)^[10],但沿海地区居住人口占总人口的39%^[3,10]。有研究表明,美国约有14%的天然海岸线被硬化(约为22 842 km),且大西洋海岸、太平洋海岸和墨西哥湾海岸线硬化程度不同,比例分别为13%、16%和16%^[3]。

在澳大利亚,悉尼河口地区32%~49%的海滩被人为改造^[11]。在英国,英格兰和威尔士44%的海岸线建立了防护堤坝^[12]。中国大陆沿海共包括9个省、2个直辖市及2个特别行政区,海岸线总长为20 966.18 km。其中广东省海岸线最长,为4 114.3 km,占海岸线总长的19.62%;其次为福建省和山东省,分别占比

16.63%和15.95%;海岸线最短的为上海、天津和澳门,分别仅为211、153.2 km和20.6 km。中国大陆人工海岸线为12 215.24 km,占海岸线总长度将近60%^[13],与美国和欧盟比较,海岸硬化比例较高。沿海各省(市、区)中,仅山东、海南、香港3区域人工海岸线占比小于50%,福建人工海岸线占比为50.61%,其余各省(市、区)人工海岸线占比均超过60%(图1)。中国大陆沿海地区总人口数为59 994万,占全国人口数的43.4%,沿海地区的平均人口密度为845人·km⁻²,为全国平均人口密度(144人·km⁻²)的5倍多。据相关统计数据表明,沿海地区人口逐年增加,占全国总人口数的百分比也在逐年增大^[14],这表明中国沿海地区受到人类活动的压力越来越大,沿海生态系统受人类活动的威胁也越来越大。

2 硬质海岸防护类型及其生态效应

2.1 硬质海岸防护类型

海岸线硬化一直是抵御海岸侵蚀、风暴风险和海平面上升的有效设施。在过去的50年中,由于海岸侵蚀严重,海岸线硬化已经成为哥伦比亚共和国防御滨海侵蚀的主要策略^[15]。海岸的硬质型结构主要包括海堤(Seawall)或舱壁(Bulkheads)、倾斜的抛石(如岩石)护堤(Riprap revetment)、交叉拱(Groins)、码头(Jetties)或防波堤(Breakwater)等^[3]。海堤(包括舱壁)和护堤是海岸上的平行结构,用来保护海岸后面的陆地免受间歇性风暴引起的侵蚀或长期的海洋慢性侵蚀。交叉拱是一种长而窄的结构,建于海岸线上,或略斜于海岸线,通常延伸到潮下带,它们的设计目的是减少沿岸洋流,从而减少沿岸漂移,在拱之间保留海滩泥沙,稳定和拓宽海滩,或延长海滩寿命。防波堤被定义为一种硬质海岸平行结构(偶尔倾斜放置),通过形成一个防护结构来保护一段海岸线,它的顶端可能位于静止水位之上(出现)或低于静止水位(淹没)。在防波堤的设计中有许多变体,包括单一或分段防波堤、出现或淹没的防波堤、窄防波堤或宽防波堤等^[16](图2a、b、c)。

2.2 硬质海岸的生态效应

海岸硬化以多种方式对自然生态系统产生影响,包括潮间带生境的重要物理、化学和生物过程的改变^[17],生境丧失和破碎化,以及生物连通性的改变^[18]等。

2.2.1 重要物理、化学和生物过程的改变

海岸硬化降低了滨海区域泥沙侵蚀速率^[19-20],同

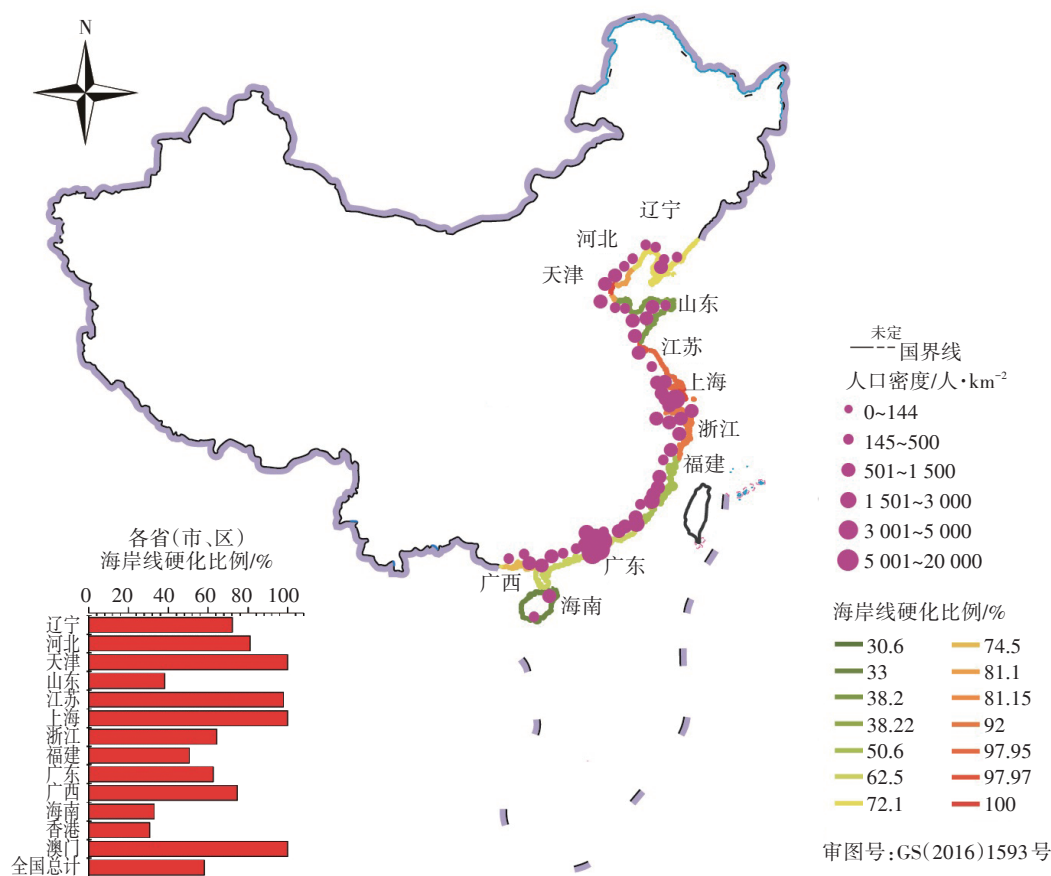


图1 中国大陆沿海人口密度及海岸线硬化比例

Figure 1 The population density and artificial coastline of Chinese mainland

时也减少了沿海地区的沉积物供应,以及海滩上可用的沉积物数量,并导致海岸线位置的总体性退移^[21]。在大尺度上,海岸硬化可以广泛改变水循环模式和泥沙运输模式^[19],比如防波堤可以改变水流方向和流速^[22]以及泥沙动态与驱动因子的关系^[23]。在干扰潮流的过程中,这些结构促使其上游堆积沉积物和物质,从而减少向下游的供应^[24]。其他的一些硬化结构,如海堤和人工珊瑚礁,通过阻断沿岸和海洋的潮流,影响种子和幼虫的运输。例如,马蹄蟹往往在海岸线的不连续处(如沿码头和舱壁之间)产卵^[25]。中尺度上,海岸硬化改变了水的停留时间和有机物的保留时间^[22]。游船区的围堤建设、防波堤建设减小了波能和水流,使得水和悬浮粒子的停留时间延长^[26]。较长的停留时间可能会影响无区系物种的幼虫的扩散,进而影响底栖动物的繁殖^[27]。较长的停留时间同样会增加水的浑浊度、温度和pH^[28]。而温度和pH则会影响昆虫幼虫的存活率^[29]以及非动物群落的组合结构^[30]。在较小的空间尺度(cm-m),海岸硬化通过几

种与水流有关的机制直接影响底栖生物的生存环境及取食行为。例如,从海堤和舱壁反弹的波浪可能通过改变取食器官的尺寸,在小尺度上影响浮游动物的取食行为^[31]。

2.2.2 生物群落结构改变,生境丧失和破碎化

滨海湿地生物群落结构改变、生境关系以及栖息地丧失也与海岸硬化有关^[17,32]。有研究表明,防波堤坝内外的群落结构不同^[28,33-34],且防波堤的建设会对其附近的潮间带群落结构产生影响。例如,防波堤促使附近潮间带群落以消费者为主向以生产者为主的群落转变^[34]。学者在研究悉尼港自然生境和人工生境中群落的结构变化时发现,自然生境中的草食动物比人工生境中高40%,而人工生境中的食腐动物比自然生境中高8倍之多^[35]。除了导致生物群落结构的变化外,海岸硬化还可以造成生境的丧失。有研究表明,黄海滩涂面积在过去50年中已丧失高达65%,其主要与水产养殖和盐池土地扩张而修建的海堤有关^[36]。



图2 海岸防护类型(a~c 硬质海岸;d~f 混合型海岸;g~i 软质海岸)

Figure 2 The types of coastal defense(a~c:harden;d~f:hybrid;g~i:soft)

2.2.3 生物连通性改变

不同类型的防潮工程已被证明影响系统的生物连通性。海岸硬化是破坏生物连通性最主要的工程之一。它可以通过以下方式改变生物连通性:①为某些生物或资源的流动设置物理障碍。例如许多生物经常在海洋和陆地系统之间移动,沙滩的高潮带和潮上带对于水生物种,如海龟、淡水龟或海豹,可能是重要的筑巢或休憩场所^[37-38]。虽然在潮下带建造的防波堤在某些情况下可能会增加新的休憩地点^[39],但垂直的海堤阻止了这些生物的移动^[37-38]。②引入新的结构,作为某些有机体或资源在整个景观中移动的渠道。例如,对于许多依赖于硬底物的海洋生物来说,缺乏硬底物或硬质底物密度较低的大片海洋区域可能是影响其扩散的天然屏障。海岸硬化提供了新的硬底物,可使一些物种能够突破现有的屏障,或扩展新的迁移途径^[18,32,40]。③改变营养连通。海岸硬化通过影响捕食者和被捕食者的相互关系以及有机碎屑的补给来改变系统中的营养连通。固着在潮汐淹没的海堤上的藻类和无脊椎动物群落是游泳食草动物和捕食者的重要食物资源。有研究表明,鱼类在海堤

附近的觅食率高于邻近海岸线^[41],而且在某些情况下,相比自然栖息地,海堤生境可为更多幼鱼提供育幼场所^[42]。有机碎屑作为生物体的食物来源,不仅产生于生物体本身所处的栖息地,而且会在栖息地间进行传输。因此海岸硬化也会影响有机碎屑的“源-汇”模式,进而影响生物体的营养结构^[43]。

3 硬质海岸对滨海湿地生态影响的对策

由于传统的海岸硬化设施本身结构简单,并不能像天然的海岸线一样提供复杂的生境,所以硬化的海岸一般生物多样性和生物数量都比较低^[3,44]。但近年来,有关研究表明,海岸硬化也会对滨海湿地生物多样性产生积极的影响,可以为某些生物提供生境场所^[45],尤其是外来物种^[46-47]。例如,防波堤保护的生境中群落具有更强的时间稳定性,非原生大型藻类群落较多^[33]。海岸硬化增加了幼鱼的潜在生境区域,与自然生境相比,幼鱼在硬化结构内密度较高^[45]。Huang等^[48]发表于*Science*上的研究表明,海堤的建设使得硬质基质结构成为岩质海岸生物的“垫脚石”,促进了中国北方和南方种群间的基因流动,扩大它们的生物地

理范围,海堤建设下生物多样性正呈现出增加的趋势。但总体而言,传统的海岸硬化设施对滨海湿地生态系统造成的影响弊大于利。为了减小海岸硬化对滨海湿地生态系统造成的不利影响,同时提高海岸的防御能力,学者们提出了许多措施,并进行了相应的研究。总体来说,主要的措施有两种:第一,提高传统海岸硬化设施结构的表面复杂性,通过增加沿海生境的异质性,提高滨海湿地的生物多样性^[49];第二,由混合型海岸防护设施代替传统的海岸硬化设施^[2],修复受损的滨海湿地,增加生态系统的服务功能。

3.1 提高硬化海岸设施的表面结构复杂性

增加硬化海岸表面结构的复杂性(图3),可以增强滨海湿地生境异质性^[49],为生物创造更多的栖息地^[50],有助于减弱海岸硬化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丰富度和生物多样性^[51]。Loke等^[52]的研究表明,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影响不同。不同尺寸的表面结构也会影响生物的丰富度和群落结构^[53]。海堤表面上增建岩池(Rock pools)可以为垂直的海堤创造阴凉条件,并在低潮时保存水分,这种新的栖息地增加了小叶藻类、固着动物和游泳动物的多样性^[54]。不同的潮位上,岩池对生物丰富度的影响也不同,相比于高潮位,中潮位的岩池支持更大的生物丰富度^[51]。海堤的粗糙度对潮间带生物丰富度也有重要影响,Coombes等^[55]的研究表明,表面建造微小尺度刻沟(Groove)的海堤比表面光滑的海堤固着的甲壳动物更多。

3.2 混合型海岸防护设施代替传统海岸硬化设施

传统的硬质海岸防护设施旨在抵御侵蚀和增强海岸抵抗风暴的能力,但从根本上说,它们缺乏复原能力,因其防护能力会随着时间的推移而减弱^[56],而且需要经常维护和修理^[57]。此外,已有研究证明硬化

的海岸对沿海生境的可持续性和依赖这些生境的生物群落具有不利影响^[7,58]。目前混合型海岸(图2d、e、f)在海岸的开发与管理中越来越受到重视,因为其综合了自然岸线和工程海岸线的一些最佳特性,有潜力提高沿海生态系统的复原力,同时可以恢复关键生态系统,或在可能丧失生态系统的地区维持生态系统的稳定性^[59]。混合型结构通常利用植物或者其他自然元素,通过结合硬质海岸结构,稳固河口海岸、海湾和河道。但是,目前以混合型海岸线替代硬化海岸线的条件还不成熟,虽然美国已经批准并建造了200多个被认定为混合型海岸的项目^[60],但有关硬质海岸和混合海岸的生态服务功能及抵御风暴能力的评估还比较缺乏。Smith等^[59]比较了混合型海岸、硬质海岸和软质海岸对飓风的抵御能力,其结果表明,混合型海岸比硬质海岸(舱壁)和软质海岸(天然沼泽)具有更好的抗侵蚀能力,而且混合型海岸比硬化的海岸更有弹性;与天然沼泽相比,混合型海岸中互花米草具有较高的茎密度。Gittman等^[58]的研究表明,混合型海岸比自然海岸和硬化海岸具有更多的鱼类丰度和多样性,但这些生态系统服务功能的提高存在时间滞后效应。Sutton等^[61]系统比较了硬质海岸、混合型海岸和软质海岸的优势和不足,具体见表1,但这仅仅是一些表观上的比较。混合型结构所带来的生态效应还需要进一步研究。

4 总结和展望

(1)海岸硬化可以有效抵御海岸侵蚀、风暴潮等的发生,但由于其用“硬”的工程结构来武装海岸,造成了滨海湿地潮间带重要物理、化学和生物过程的改变,以及生境丧失和生物连通性的改变,对沿海生境的可持续发展和生物群落产生不利影响。

(2)增加硬化结构的表面复杂性,或者以混合型



图3 硬质海岸复杂结构图

Figure 3 Sophisticated structure on coastal hardening defense

表1 不同海岸防护类型的优势与不足^[61]Table 1 Strengths and weaknesses of coastal defense types^[61]

海岸类型 Types	优点 Advantages	不足 Weaknesses
硬质海岸	理论知识完善,设计方法及实施经验丰富,有特定的工程标准等	不能适应不断变化的条件(海平面上升);防御效果随着时间的推移而变弱;可能导致沿海生境丧失,并对附近沿海生态系统提供的生态系统服务产生负面影响等
混合型海岸	设计灵活,方式多样;生物多样性受损小,防御效果好;所需空间小;后期维护成本低	理论知识缺乏,设计方式及实施经验不足,后期跟踪数据缺乏;评估体系不完善等
软质海岸	生物多样性高;生态服务功能强;受损一定程度可以自我恢复;一定程度上能适应不断变化的条件;成本低	生态系统修复实践经验少;防御效果因生态系统不同而不同;时间长;所需空间尺度大;管理经验少等

海岸代替硬化海岸可以减小海岸硬化对滨海湿地生态系统造成的不利影响,同时可以提高海岸的防御能力。

(3)硬质海岸结构和混合型海岸结构所处的自然条件不同,尺度也不同,所以在生态服务功能的评估中存在诸多困难。

目前我国的人工海岸占比近60%,虽然在混合型海岸防护中已经有一些探索和实践,但我国的海岸防护仍然以硬质海岸为主,生态恶化的整体趋势并没有得到有效改善。所以我国科学家、海岸工程技术人员及管理人员,需要进行跨学科研究,大力推进我国沿海混合型海岸生态修复工程建设,同时有效评估硬质海岸和混合型海岸这两种海岸结构的防御效果及成本效益,进而在不同的区域选择不同的防御结构,以降低沿海地区环境的脆弱性。

参考文献:

- [1] Goudie A S. The human impact on the natural environment: Past, present, and future[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2013: 169-210.
- [2] Morris R L, Konlechner T M, Ghisalberti M, et al. From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 1827-1842.
- [3] Gittman R K, Fodrie F J, Popowich A M, et al. Engineering away our natural defenses: An analysis of shoreline hardening in the US[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2015, 13(6): 301-307.
- [4] Bulleri F, Chapman M G. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(1): 26-35.
- [5] Bird E C F. Coastline changes: A global review[M]. New York: Wiley and Sons, 1985: 95-146.
- [6] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st Century sea-level rise[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(9): 3292-3297.
- [7] Dugan J E, Airolidi L, Chapman M G, et al. Estuarine and coastal structures: Environmental effects, a focus on shore and nearshore structures [M]//Wolanski E, McIlusky D. Treatise on estuarine & coastal science. London: Academic Press, 2011: 17-41.

- [8] Frid C, Hammer C, Law R, et al. Environmental status of the European seas[M]//External relations law of the European Community. Kluwer Law International, 2003: 209-212.
- [9] European Environment Agency (EEA). The changing faces of Europe's coastal areas[R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2006: 41-43.
- [10] NOAA. What percentage of the American population lives near the coast?[EB/OL]. (2018-06-25). <https://oceanservice.noaa.gov/facts/population.html>.
- [11] Creese R G, Glasby T M, West G, et al. Mapping the habitats of NSW estuaries[M]. Nelson Bay: Industry & Investment NSW, 2009: 95.
- [12] Robert R. The earth in our hands[R/OL]. [2019-03-05]. <https://www.imdb.com/title/tt0147136/>.
- [13] Ma Z J, Melville D S, Liu J G, et al. Rethinking China's new Great Wall[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [14] 赵鹏, 李长如. 中国沿海地区人口趋海移动研究[J]. *海洋经济*, 2013, 3(1): 18-25.
ZHAO Peng, LI Chang-ru. Research on the people moving towards the sea in the coastal region of China[J]. *Marine Economy*, 2013, 3(1): 18-25.
- [15] Rangel B N, Williams A T, Anfuso G. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 156: 58-75.
- [16] Luo S L, Cai F, Liu H J, et al. Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People's Republic of China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103: 134-145.
- [17] Perkins M J, Ng T P T, Dudgeon D, et al. Conserving intertidal habitats: What is the potential of ecological engineering to mitigate impacts of coastal structures? [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2015, 167: 504-515.
- [18] Bishop M J, Mayer P M, Airolidi L, et al. Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: Impacts and solutions[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2017, 492: 11-24.
- [19] Franz G, Delpey M T, Brito D, et al. Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents[J]. *Ocean Science*, 2017, 13(5): 1-26.
- [20] Isla F I, Cortizo L, Merlotto A, et al. Erosion in Buenos Aires Province: Coastal-management policy revisited[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 156: 107-116.

- [21] Coelho C, Cruz T, Roebeling P. Longitudinal revetments to mitigate overtopping and flooding: Effectiveness, costs and benefits[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 134:93–102.
- [22] Heery E C, Bishop M J, Critchley L P, et al. Identifying the consequences of ocean sprawl for sedimentary habitats[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2017, 492:31–48.
- [23] Bastos L, Pinho J L S, Granja H, et al. Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2012, 109(8):53–69.
- [24] Pattiaratchi C, Bosserelle C. Sand and seagrass wrack modelling in Port Geopraphe, south-western Australia[C]//Coasts and ports: Diverse and developing: Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference. Barton ACT: Engineers Australia, 2011: 564–569.
- [25] Jackson N L, Nordstrom K F, Saini S, et al. Influence of configuration of bulkheads on use of estuarine beaches by horseshoe crabs and foraging shorebirds[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7): 5749–5758.
- [26] Zanuttigh B, Martinelli L, Lamberti A, et al. Environmental design of coastal defence in Lido di Dante, Italy[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(10):1089–1125.
- [27] Sim V X Y, Dafforn K A, Simpson S L, et al. Sediment contaminants and infauna associated with recreational boating structures in a multi-use marine park[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(6):e0130537.
- [28] Munari C. Benthic community and biological trait composition in respect to artificial coastal defence structures: A study case in the northern Adriatic Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 90(3): 47–54.
- [29] Talmage S C, Gobler C J. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on the growth and survival of larvae and juveniles of three species of northwest Atlantic bivalves[J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(10):e0026941.
- [30] Hale R, Calosi P, McNeill L, et al. Predicted levels of future ocean acidification and temperature rise could alter community structure and biodiversity in marine benthic communities[J]. *Oikos*, 2011, 120(5):661–674.
- [31] Li N K, Denny M W. Limits to phenotypic plasticity: Flow effects on barnacle feeding appendages[J]. *Biological Bulletin*, 2004, 206(3): 121–124.
- [32] Dong Y W, Huang X W, Wang W, et al. The marine ‘great wall’ of China: Local – and broad-scale ecological impacts of coastal infrastructure on intertidal macrobenthic communities[J]. *Diversity & Distributions*, 2016, 22(7):731–744.
- [33] Vaselli S, Bulleri F, Benedetticocchi L. Hard coastal-defence structures as habitats for native and exotic rocky-bottom species[J]. *Marine Environmental Research*, 2008, 66(4):395–403.
- [34] Martins G M, Amaral A F, Wallenstein F M, et al. Influence of a breakwater on nearby rocky intertidal community structure[J]. *Marine Environmental Research*, 2009, 67(4):237–245.
- [35] Mayerpinto M, Cole V J, Johnston E L, et al. Functional and structural responses to marine urbanization[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1):2–17.
- [36] Murray N J, Clemens R S, Phinn S R, et al. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2014, 12(5):267–272.
- [37] Winters J M, Avery H W, Standora E A, et al. 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*, 2015, 79(4):682–688.
- [38] Merel V D M, Hudson P F. 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*, 2018, 302:62–75.
- [39] Firth L B, Knights A M, Mieszkowska N, et al. Ocean sprawl: Challenges and opportunities for biodiversity management in a changing world[J]. *Oceanography & Marine Biology*, 2016, 54:189–262.
- [40] Choi C Y, Jackson M V, Gallo C E, et al. Biodiversity and China’s new Great Wall[J]. *Diversity & Distributions*, 2018, 24(2):137–143.
- [41] Munsch S H, Cordell J R, Toft J D, et al. Effects of seawalls and piers on fish assemblages and juvenile salmon feeding behavior[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2014, 34(4):814–827.
- [42] Pastor J, Koeck B, Astruch P, et al. Coastal man-made habitats: Potential nurseries for an exploited fish species, *Diplodus sargus*, (Linnaeus, 1758)[J]. *Fisheries Research*, 2013, 148(6):74–80.
- [43] Heatherington C, Bishop M J. Spatial variation in the structure of mangrove forests with respect to seawalls[J]. *Marine & Freshwater Research*, 2012, 63(10):926–933.
- [44] Gittman R K, Peterson C H, Currin C A, et al. Living shorelines can enhance the nursery role of threatened estuarine habitats[J]. *Ecological Applications*, 2016, 26(1):249–263.
- [45] Mercader M, Rider M, Cheminée A, et al. Spatial distribution of juvenile fish along an artificialized seascape, insights from common coastal species in the northwestern Mediterranean Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2018, 137:60–72.
- [46] Dafforn K A, Johnston E L, Glasby T M. Shallow moving structures promote marine invader dominance[J]. *Biofouling*, 2009, 25(3):277–287.
- [47] Airoldi L, Turon X, Perkol F S, et al. Corridors for aliens but not for natives: Effects of marine urban sprawl at a regional scale[J]. *Diversity & Distributions*, 2015, 21(7):755–768.
- [48] Huang X W, Wang W, Dong Y W. Complex ecology of China’s seawall[J]. *Science*, 2015, 347(6226):1079.
- [49] Airoldi L, Abbiati M, Beck M W, et al. An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(10/11):1073–1087.
- [50] Cousins L J, Cousins M S, Gardiner T, et al. Factors influencing the initial establishment of salt marsh vegetation on engineered sea wall terraces in southeast England[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 143:96–104.
- [51] Firth L B, Thompson R C, White F J, et al. The importance of water-retaining features for biodiversity on artificial intertidal coastal de-

- fence structures[J]. *Diversity & Distributions*, 2013, 19(10): 1275–1283.
- [52] Loke L H L, Todd P A. Structural complexity and component type increase intertidal biodiversity independently of area[J]. *Ecology*, 2016, 97(2): 383–393.
- [53] Loke L H L, Bouma T J, Todd P A. The effects of manipulating micro-habitat size and variability on tropical seawall biodiversity: Field and flume experiments[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2017, 492: 113–120.
- [54] Chapman M G, Blockley D J. Engineering novel habitats on urban infrastructure to increase intertidal biodiversity[J]. *Oecologia*, 2009, 161(3): 625–635.
- [55] Coombes M A, Marca E C L, Naylor L A, et al. Getting into the groove: Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 77: 314–323.
- [56] Gittman R K, Popowich A M, Bruno J F, et al. Marshes with and without sills protect estuarine shorelines from erosion better than bulkheads during a Category 1 hurricane[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 94–102.
- [57] Smith C S, Gittman R K, Neylan I P, et al. Hurricane damage along natural and hardened estuarine shorelines: Using homeowner experiences to promote nature-based coastal protection[J]. *Marine Policy*, 2017, 81: 350–358.
- [58] Gittman R K, Scyphers S B, Smith C S, et al. Ecological consequences of shoreline hardening: A meta-analysis[J]. *Bioscience*, 2016, 66(9): 763–773.
- [59] Smith C S, Puckett B, Gittman R K, et al. Living shorelines enhanced the resilience of saltmarshes to Hurricane Matthew (2016)[J]. *Ecological Applications*, 2018, 28(4): 871–877.
- [60] Fear J, Bendell B N C. Division of coastal management assessment of 27 marsh sills in North Carolina: Final report[R]. Morehead City: N C Division of coastal management assessment, 2011.
- [61] Sutton G A E, Wowk K, Bamford H. 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*, 2015, 51: 137–148.