

欧美国家盐沼湿地生态恢复的基本观点、 技术手段与工程实践进展

陈雪初¹, 高如峰², 黄晓琛³, 唐剑武⁴

(1. 华东师范大学,上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室,上海 200241;2. 上海海洋管理事务中心,上海 200050;3. 上海东海海洋工程勘察设计研究院,上海 200137; 4. 美国海洋生物实验室,伍兹霍尔 02543)

摘要:在我国,较大面积比例的盐沼湿地已在人为干扰与自然侵蚀的共同作用下,逐渐受损、退化并消亡。最近 20 a 来,在发达国家特别是美国,随着许多大规模盐沼湿地恢复工程的实施,为生态恢复理论提供了实践与验证的场所,在该领域正在逐渐形成基本观点与技术方法体系,这为我国今后开展类似工作提供了重要参考。本文探讨近年来欧美等国在盐沼湿地生态恢复方面的基本观点包括:受损与退化成因,生态恢复目标,生态恢复主要驱动力等;并总结生态恢复主要技术方法包括基底修复技术,水动力修复技术,植物引种技术等;进一步地以 Delaware 湾、Jamaica 湾、Schelde 河口为例介绍欧美等国在盐沼湿地恢复工程方面的最新进展;在此基础上针对我国国情,提出盐沼湿地保护与恢复的建议。

关键词:盐沼湿地;生态恢复;基本观点;技术手段;工程实践;进展

中图分类号:X171.4 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2016)03-0467-06

Basic views and technological methods of salt marsh restoration and its progresses in implementation

CHEN Xue-chu¹, GAO Ru-feng², HUANG Xiao-chen³, TANG Jian-wu⁴

(1. East China Normal University, Shanghai Key Laboratory for Urban Ecology and Sustainability, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200050, China; 3. East China Sea Marine Engineering Survey & Design Institute, Shanghai 200137, China; 4. Marine Biological laboratory, Woods Hole 02543, USA)

Abstract: A large amount of salt marshes in China now are being damaged, degraded, or even disappeared due to the combined effects of human disturbances and natural erosion. During the last 20 years, in some developed countries such as the United States, a branch of large-scale salt marsh restoration projects have been implemented, which provide opportunities for testing restoration theories. As a result, series of basic views and mainstream technologies have been developed, and such progresses are valuable for the future implementation of salt marsh restoration in China. This article discussed some basic views towards salt marsh restoration, including the mechanisms for the damage and degradation, the goals of the restoration, and the driving forces. Also, some mainstream technologies including sediment amendment, hydraulic remediation, and transplantation were summarized. Moreover, three representative projects which located at Delaware Bay, Jamaica Bay, and Schelde Estuary were taken as examples to illustrate the progresses in restoration implementation. Based on the progresses in Europe and America, and also considering the local needs, we further proposed suggestions for implementing salt marsh restoration in China.

Key words: salt marsh; restoration; basic views; mainstream technologies; implementation; progresses

收稿日期:2015-01-20, 修订日期:2015-04-15

基金项目:国家海洋局海域管理技术重点实验室基金(201310);中央海域使用金项目-杭州湾北岸整治修复奉贤岸段示范项目;2015 年中央海岛和海域保护资金项目-金山城市沙滩西侧综合整治及修复

作者简介:陈雪初(1980-),男,浙江温州人,副教授,博士,研究方向为生态恢复与长期生态观测,E-mail:cxcsnow@163.com

海岸带盐沼湿地(Salt marsh)是介于陆域和海洋之间的生态缓冲区域,具有很高的生产力和丰富的生物多样性,为海岸带提供极为重要的生态服务功能。另一方面,有研究显示,在气候变化、海平面上升、围垦、近岸污染等因素共同作用下,全球20%~45%的盐沼湿地将在本世纪内消亡^[1-2]。如何保护盐沼湿地资源,有效恢复受损盐沼湿地,已成为生态学分支学科-恢复生态学领域的重大问题之一。

在我国,较大面积比例的盐沼湿地已在人为干扰与自然侵蚀的共同作用下,逐渐受损、退化并消亡^[3-4]。近年来,各级政府部门已逐渐意识到盐沼湿地对于海洋生态系统保育、沿岸带城镇可持续发展的重要价值,一些地方尝试开展了针对盐沼湿地的生态恢复工作,然而迄今为止成功的工程案例还并不多见。另一方面,从国际上来看,退化盐沼湿地生态恢复问题已引起全球范围的关注,不少国家已率先开展了一些盐沼湿地恢复的实际工程,其中欧美国家盐沼湿地恢复工作开展得较为深入。早期的恢复工程主要以小尺度、零星的单个项目为主,至21世纪初重心逐渐转移至大尺度的区域性的盐沼湿地的恢复,较为典型的案例有美国的 Delaware 湾湿地^[5-6]、Jamaica 湾湿地^[7]、San Francisco 湾湿地^[8],加拿大的 Fundy 湾湿地^[9]、比利时的 Schelde 河口湿地等^[10]。

海岸带盐沼湿地生态恢复是通过符合生态学原理的工程技术手段,减小盐沼湿地的受损程度,减缓甚至逆转盐沼湿地的退化趋势,使之恢复正常的生态系统结构和功能的过程。从理论方面来看,盐沼湿地生态恢复是涉及到生态学、环境学、海岸工程学等诸多领域的学科交叉问题。最近20 a来,在发达国家特别是美国,随着许多大规模盐沼湿地恢复工程的实施,为生态恢复理论提供了实践与验证的场所,在该领域正在逐渐形成基本观点与技术方法体系,这为我国今后开展类似工作提供了重要参考。本文总结并探讨了近年来欧美等国在盐沼湿地生态恢复方面的基本观点、技术方法和典型工程案例,在此基础上针对我国国情,提出盐沼湿地保护与恢复的建议。

1 盐沼湿地生态恢复的基本观点

1.1 盐沼湿地的状态:“受损”(Damage)与“退化”(Degradation)

盐沼湿地按照受干扰与破坏程度的不同,可

大致分为正常、受损、退化与消亡4种状态^[11-12]。“受损”是指在短时间内出现的较强干扰条件,诸如自然侵蚀、人工围垦、海面溢油等作用下,盐沼湿地局部受到破坏或部分生态功能丧失,典型的情况如在北半球海湾、河口北岸,常常因为飓风或台风加强了波浪侵蚀力,从而导致植被破坏、湿地基底丧失^[2,13];退化是指在长期、低强度的干扰条件下,盐沼湿地系统生态系统结构与功能发生不可逆的变化,最为常见的是在湿地周边构筑堤坝、内部修建道路桥梁,从而改变了湿地原有的潮汐水动力条件,导致湿地水体淡化,建群种由耐盐植物(北美地区本地种为互花米草)转变为不耐盐植物(芦苇、香蒲等),进而导致湿地生物群落发生根本性变化,原有的生态系统服务功能丧失^[1,14];另外一种普遍的退化成因在最近才得到确认,即由于外源性氮污染的长期输入,逐渐影响盐沼植物自身的生理生态功能,导致地上部生物量、根系生物量、湿地微生物种群等发生变化,最终表现为植物倒伏消亡,湿地表面裸露变成光滩,这种现象在受氮输入影响最大的湿地潮沟附近最为明显^[15-16]。

1.2 生态恢复的目标(Goal):“复原”(Returning)与“重构”(Recreating)

确定生态恢复的目标是实施生态恢复工程的必要前提。生态恢复的基本定义为辅助(Assisting)正在退化、受损、或面临消亡生态系统自我修复的过程,或者说促使生态系统复原到接近受干扰之前的状态^[17]。从这个定义来看,盐沼生态恢复的目标可设定为复原到“受损或退化之前的自然状态”,因此在许多盐沼湿地恢复的具体工程实践中,常常将现状受损退化湿地附近的无干扰自然湿地作为对照样地(Reference site)^[12],以确定需要导入的主要植物物种类型及其空间分布格局,和相应的生态工程调控手段。然而,在工程实践中生态学家们逐渐认识到,盐沼湿地恢复工程很难达到100%的复原目标,这与盐沼湿地的本底环境条件、受干扰程度、恢复时间等有关^[12]。因此,对以“复原”为主要目标的盐沼湿地生态恢复工程,在实施前必须对“对照样地”的水文水质现状、基底条件、植物分布格局、生物群落状况等开展系统的生态学、环境学调查,辨识盐沼植物与本地自然环境长期相互作用下形成的湿地生态系统的结构特点与功能特征;另一方面,同样要对目

标恢复湿地的受损和退化状况进行调查评估,识别主要干扰因子、生态系统结构与功能受损害的具体症状;在此基础上,以生态学的基本原理为指导,结合工程可实施性的要求,最终确定合适的恢复目标^[18]。

最近著名生态工程学家 Mitsch 针对湿地恢复目标提出了新的观点,认为并不应仅仅将其定位为“复原”,而是应当是和“生态工程目标定位”一致,实现更进一步的“重构”,即通过人工辅助,重新构建一种具有可持续性的,同时有利于人类与自然的生态系统,以使得这种生态系统能够为人类提供更好的生态服务功能,诸如削减陆源污染、保护近岸免受台风、海啸灾害的影响等^[19]。正如 Mitsch 所言,“既然我们无法百分之一百地回到伊甸园,那么回去百分之七十五也不是一件坏事”^[19]。这种新的目标定位为我们提供了新的视角:盐沼湿地既然介于人类社会系统与自然生态系统的缓冲区域,那么它就应当同时具有自然属性和人类社会属性。虽然目前盐沼湿地生态恢复领域的工程实践极少明确以“重构”说为指导思想,但是很多具体工程都不自觉地朝着“重构”的方向实施,这为未来“重构说”观点的深化提供了实践基础。

1.3 生态恢复的驱动力(Driving force):“人工干预”与“自然演替”

盐沼湿地生态恢复的主要驱动力是“人工干预”,还是“自然演替”是生态恢复理论研究与实践中最受争议的一点。在欧美等国,主导生态恢复工程方案设计的一般为咨询公司,从工程可实施性角度出发,盐沼湿地生态恢复显然应当是可预测的,具体到工程手段与工程量、工程恢复周期、恢复湿地的最终规模、关键考核指标等都必须可以量化^[20];然而从生态学的角度来看,多数生态学家都认为盐沼湿地生态恢复应当是自然生态系统消除干扰之后的次生演替过程^[12,21]。在这个过程中物种演替的先后次序虽然可以预测,但却无法准确到何时何地发生,另一方面由于在恢复工程实施之前,无法完全掌握工程区域的水文、基质、植被等关键因子的长期变化数据,也增加了预测生态恢复效果的难度。关于“生态恢复效果是否可以预测”的争议,实际上是从“生态学”与“工程学”两个不同角度看待同一个问题而得出相左观点的必然结果。就这一问题,Mitsch 提出

生态恢复的基本原则应当是“以自然为母,以时间为父”^[19,22],这种观点的核心是以“人工干预”为辅,以“自然演替”为主,具体而言,盐沼湿地恢复应在尽量少的人工干预条件下实施,主要依靠生态系统自设计、自组织,在长时间尺度条件下自然演替到接近原初的状态。

2 生态恢复的主要技术手段

2.1 基底修复技术

盐沼湿地基底在上游下泄泥沙与海洋潮汐共同作用下形成,当泥沙来量下降,或风浪侵蚀力加强时,湿地基底可能在短期内大量损失,继而植物消亡^[2],因此基底修复常常是受损湿地恢复的关键步骤之一。在欧美等国家,在实施基底修复时,常常以受损湿地附近航道疏浚、运河疏挖等产生的工程弃土为基底原料,采用原位吹填的方式直接修复基底^[7,23]。在人工抬升基底过程之前,需要预先评估基底原料的材质特性,如“粘土”和“沙土”质基底适用于不同的湿地恢复场地和先锋植物;另一方面,对基底的营养条件和受污染程度也必须进行先期测评,以确保基底有利于先锋植物自然生长的同时,不对周边水域产生二次污染^[23]。除了直接的基底修复之外,对于一些坡度较大,自然侵蚀较为严重的湿地边缘,也可采用土工护坡结构消减风浪与固定基底,如固沙网,松木桩,土石坝等^[24-25]。

2.2 水动力修复技术

在海洋潮汐驱动下,盐沼湿地和近岸水体进行周期性的物质交换,达成营养物质收支的动态平衡;同时鱼类、大型底栖动物等随潮汐进出潮沟,或索饵或隐蔽,从而促成了盐沼湿地丰富的生物多样性^[26]。在欧美等国,盐沼湿地的退化问题最为常见,主要由于筑堤、建桥、修路等人为活动造成盐沼湿地与近岸水体的连接度下降,水体淡化导致盐沼植物被芦苇、香蒲等淡水种所替代^[1,27],因此“水动力修复”技术是目前欧美国家最为常见的盐沼湿地恢复手段。“水动力修复”技术实施时一般先打开湿地外围堤坝,形成缺口,引导潮汐进出湿地,同时开挖湿地内部潮沟,以调节内部水流分配,提升湿地持水时间,促进盐沼植物自然生长^[28]。值得注意的是,在具体实施之前,必须先构建水动力模型,并严格进行水工计算,在此基础上方能确定技术方案,以确保技术实

施后水动力条件的变化不会影响湿地基底的稳定^[29]。

2.3 植物引种技术

植物引种技术主要针对一些植物自然生长过缓,或对植物物种有特定要求的恢复湿地实施,常见的有“种子播撒”、“外来植物移栽”、“原位植物移栽”等三种方式^[12,30]。种子播撒法成本最低,但成活率也相对较低;外来植物移栽时植株密度的选择是成功与否的关键之一,植株密度的高低决定了技术成本,同时也影响着工程实施后植物的自然生长速度和郁闭程度^[12,30];“原位植物移栽”多在恢复湿地外围受损严重的区域实施,即利用湿地现存的本地植物及其基底,将其搬运至目标区域,形成植物岛丘,该法的成本较高,但具有可保留本地底栖动物和基底微生物的优势^[7]。在植物引种技术实施之前,必须先确定“人工干预”和“自然演替”的主次关系,目前得到多数生态学家们认可的方式是先针对湿地局部有条件的区域斑块状引种植物,通过自然演替作用逐渐恢复形成本地盐沼植物丛群^[12,14]。

3 典型工程实践案例

3.1 美国 Delaware 湾盐沼生态恢复工程

上世纪90年底初,美国 Delaware 湾 Salem 核电站因为温排水对海湾生态的影响问题备受指责,促使其不得不决心投入资金对受影响海域进行生态补偿^[6,31]。在环保组织和生态专家的共同建议下, Salem 核电站向新泽西州环境保护署 (NJDEP) 提出,恢复核电站附近退化盐沼湿地是具有可操作性的生态补偿具体措施,之后经过长期评估和多方论证,最终得到 NJDEP 许可并付诸实施。在确定技术方案之前, Salem 核电站以温排水进出水口成鱼、籽稚鱼、浮游动物幼虫的死亡率为基本计算依据,构建种群变化模型,估算其对近岸生物资源的影响,进一步地结合前期开发的盐沼湿地食物链模型,估算需要恢复多少盐沼湿地才能补偿生态损失。模型研究结果显示理论恢复面积为 980 hm²,在与 NJDEP 协商之后,考虑到模型结果的不确定性,最终协定将实际恢复面积扩大为理论值的 4 倍即 4050 hm²。恢复工程针对当地因人工围堤导致生态退化的盐沼湿地而开展,以“水动力修复”为核心内容,其恢复思路为根据当地水文潮汐特征和水工模型计算结果,开

挖堤坝形成缺口,人为修复湿地主潮沟和次级潮沟,引导潮汐进出湿地,确保湿地内部形成周期性淹水与落干过程;在此基础上任由湿地内小潮沟自然发展,诱导生态演替自然发生^[5-6]。 Delaware 湾生态恢复工程于 1998 年实施,至 2012 年历经 14 a 时间,盐沼植物(互花米草)全面恢复并占据优势,最终达到了预定的恢复目标^[19]。

3.2 美国 Jamaica 湾盐沼生态恢复工程

美国 Jamaica 湾位于美国纽约州长岛西南部,是纽约城区下游的浅水湾,总面积约 67.3 km²。Jamaica 湾盐沼湿地同时面临人为干扰和自然侵蚀的影响:长期以来纽约城污水厂处理出水排入该海湾,导致水体富营养化;另一方面由于湾区的不断开发,改变了当地的水文潮汐状况和泥沙净输入,影响到了湿地基底的稳定性,研究显示 1983 年至 2003 年盐沼湿地损失速度达 13.4 hm²/a。为此自 2006 年起,由美国陆军工程兵团 (USACE) 牵头,美国国家公园管理局 (NPS)、纽约环保署 (NYS DEC) 等单位参与,在 Jamaica 湾开展了盐沼湿地恢复示范工程^[7]。第一期工程在 Elders East 和 Elders West 岛开展,总共恢复盐沼湿地面积 27.3 hm²。主要工程内容包括“基底修复”和“植物引种”两个方面。基底修复利用附近运河开挖产生的弃土,采取直接吹填的方式实施,土方工程量约为 19 万 m³;植物引种采取外来移栽和原位移栽相结合的方式,即在湿地内部区域移栽互花米草 (*S. alterniflora*)、盐草 (*Distichlis spicata*)、狐米草 (*S. patens*) 幼苗,并在恢复区外围搭建防风网,以减少砂质基底流失;同时在湿地边缘利用原生的互花米草和基底堆构植物岛丘 (Hummock),诱导盐沼植物自然生长。在工程实施 3 a 之后的 2008 年,工程主体恢复区植物盖度达到 50% 以上,其中互花米草为优势种。

3.3 比利时 Schelde 河口盐沼湿地生态恢复工程

The Schelde 河是一条 350 km 长,蜿蜒流经法国、荷兰,并在西北部比利时境内入海的国际河流。在其河口区域,为应对风暴潮带来的洪涝灾害和侵蚀问题,当地政府在局部河堤的外侧构筑了一道高程低于风暴潮水位的外堤,在主堤与外堤形成滞洪区 (Floods Control area, 简称 FCA)^[10,26]。2005 年以来,当地政府认识到应当进一步恢复滞洪区内部的湿地生态系统,发挥滞洪区的生态效应,因此对现有 FCA 进行了改造,

形成潮汐减控系统(Controlled Reduced Tide,简称CRT),其设计原理为在外堤上部设置单向进水闸,在河流处于高潮位时自动将潮水引入滞洪区;在外堤中下部设置单向出水闸,在河流处于低潮位自动将滞洪区内部水体排出,通过这种利用自然潮汐动力的设计,可调控进出湿地水量、潮差和停留时间,恢复湿地内部周期性的淹水-落干过程,以营造有利于植物生长的生境条件。截至2013年,Schelde河口区域已建成三处规模分别为 10 hm^2 、 200 hm^2 、 600 hm^2 的CRT系统,在滞洪区内成功恢复了以芦苇为优势种群的湿地植物^[26]。

4 欧美国家盐沼湿地恢复经验对我国的启示

在欧美国家,对盐沼湿地生态恢复的研究与实践已有近40a的发展历程,积累了丰富的理论认知和技术经验。在基础研究方面,“以野外样地为基础,坚持开展长期生态观测”是盐沼湿地生态恢复理论得以取得进展的重要支撑条件。以美国为例,在美国国家科学基金会(NSF)的支持下,生态学家开展了连续数十年的长期生态观测研究(LTER,如Plum Island盐沼湿地长期生态观测站),对于盐沼湿地生态系统的结构与功能、碳、氮、硫、磷营养循环过程、生态系统退化和受损机制、生态服务功能等方面,已逐渐形成了较为完备的理论体系^[32-33];最近10余年来,一些针对盐沼湿地生态恢复问题的长期生态研究也开展起来,逐渐积累了盐沼植物及其基质、底栖动物、浮游生物、鱼类等长期变化的资料,对于盐沼湿地恢复过程中生态系统次生演替机制正逐渐清晰^[12,18,34];最近几年,一些生态学家认识到盐沼湿地生态恢复过程同时也是湿地内部有机碳不断正向积累的过程,提出盐沼湿地生态恢复过程中的蓝色碳汇问题,成为了新的研究热点^[35-36]。

从工程实践方面来看,欧美国家针对退化盐沼湿地生态恢复问题开展了大量的工作,在潮汐水动力模型构建、水动力修复、植物引种等方面已形成了较为完备的技术体系。值得注意的是,在盐沼湿地生态恢复工程实践过程中,政府部门、环保组织、生态学家、工程师等都起着不可替代的作用。美国许多州政府都颁布了湿地保护法令,规定了严格保护所有现存湿地,任何影响盐沼湿地的行为都必须通过生态恢复的方式进行补偿,这对于推动盐沼湿地恢复起到了决定性的作用^[5,7,11,14,37];许

多区域性环保组织对盐沼湿地的关注促成了当地民众对恢复受损退化湿地的重要性取得共识^[5];在具体工程实践中,生态学家和工程师的紧密分工合作是盐沼湿地恢复得以成功的关键^[19]。

在欧美国家,对盐沼湿地的认识和实践经历了一个从“围垦开发到限制开发、再到重新审视湿地资源价值,逐步恢复湿地”的过程^[1]。从我国现实情况来看,长期以来大量盐沼湿地已由于人工围垦快速消失,最近10a来,人们对于盐沼湿地的生态服务功能和生态价值的认识才有所转变,盐沼湿地保护和恢复工作的重要意义开始逐渐深入人心。总体而言,我国盐沼湿地恢复工作尚处于起始阶段,应当借鉴欧美国家经验,以现有盐沼湿地生态恢复样地为基础,开展长期生态学研究,为准确认识和全面评估我国盐沼湿地的生态服务功能及蓝碳价值提供基础依据;同时将他国的实践技术经验和我国现有工作基础相结合,研究建立适合我国国情的盐沼湿地生态恢复技术准则、技术规范 and 评估体系;建立并完善盐沼湿地资源的价值评估体系,研究构建有利于盐沼湿地保护的定价机制;进一步加强对盐沼湿地保护政策及法律法规的国内外比较研究,在有条件的地区,研究采用类似于“湿地银行(Wetland bank)”^[37]的经济杠杆手段,调控市场行为,构建生态补偿模式的可行性。

与此同时,也应当认识到我国盐沼湿地恢复工作仍受人地矛盾突出这一现状的制约,不可能像欧美国家那样将大面积的围垦土地重新恢复为盐沼湿地,因此围绕现存盐沼湿地开展恢复与保护将是现阶段的重点。值得注意的是,由于目前我国很多现存盐沼湿地位于围垦区的堤坝外围,所面临的人为干扰和自然侵蚀的双重影响更大,这是在欧美国家鲜见的问题,亟待进行深入研究和实践。

参考文献:

- [1] GEDAN K B, SILLIMAN B R, BERTNESS M D. Centuries of human-driven change in salt marsh ecosystems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 117-141.
- [2] MARIOTTI G, FAGHERAZZI S. Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(14): 5353-5356.
- [3] 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 and the Environment*, 2014, 12(5): 267-272.

- [4] LI X Z, REN L J, LIU Y, et al. The impact of the change in vegetation structure on the ecological functions of salt marshes; the example of the Yangtze estuary [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(2): 623-632.
- [5] TEAL J M, WEISHAR L. Ecological engineering, adaptive management, and restoration management in Delaware Bay salt marsh restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(3): 304-314.
- [6] WEISHAR L L, TEAL J M, HINKLE R. Designing large-scale wetland restoration for Delaware Bay [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(3): 231-239.
- [7] MESSAROSR C, WOOLLEY G S, MORGAN M J, et al. The function of ecosystems [M]. Croatia; In Tech, 2012.
- [8] WILLIAMS P, FABER P. Salt marsh restoration experience in San Francisco Bay [J]. *Journal of Coastal Research*, 2001, 27: 203-211.
- [9] BEAUCHARD O, JACOBS S, COX T J S, et al. A new technique for tidal habitat restoration: Evaluation of its hydrological potentials [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1849-1858.
- [10] MARIS T, COX T, TEMMERMAN S, et al. Tuning the tide: creating ecological conditions for tidal marsh development in a flood control area [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 588(1): 31-43.
- [11] ROMANC T, BURDICK D M. Tidal marsh restoration: a synthesis of science and management [M]. Washington: Island Press, 2012.
- [12] ZEDLER JB. Handbook for restoring tidal wetlands [M]. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2000.
- [13] GEDAN K B, KIRWAN M L, WOLANSKI E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm [J]. *Climatic Change*, 2010, 106(1): 7-29.
- [14] WARREN R S, FELL P E, ROZSA R, et al. Salt marsh restoration in Connecticut: 20 years of science and management [J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 497-513.
- [15] WIGAND C, ROMAN C T, DAVEY E, et al. Below the disappearing marshes of an urban estuary: historic nitrogen trends and soil structure [J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(4): 633-649.
- [16] DEEGAN L A, JOHNSON D S, WARREN R S, et al. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss [J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 388-392.
- [17] Society for Ecological Restoration, Science & Policy Working Group. SER International Primer on Ecological Restoration [Z]. Society for Ecological Restoration, 2004, <http://ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on-ecological-restoration>
- [18] SPENCER K L, HARVEY G L. Understanding system disturbance and ecosystem services in restored saltmarshes: Integrating physical and biogeochemical processes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 106: 23-32.
- [19] MITSCH W J. When will ecologists learn engineering and engineers learn ecology? [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 65: 9-14.
- [20] PASTOROK R A, MACDONALD A, SAMPSON J R, et al. An ecological decision framework for environmental restoration projects [J]. *Ecological Engineering*, 1997, 9(1/2): 89-107.
- [21] BRAND L A, SMITH L M, TAKEKAWA J Y, et al. Trajectory of early tidal marsh restoration; Elevation, sedimentation and colonization of breached salt ponds in the northern San Francisco Bay [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 19-29.
- [22] MITSCH W J. Ecological engineering A cooperative role with the planetary life-support system [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(3): 438-445.
- [23] FORD M A, CAHOON D R, LYNCH J C. Restoring marsh elevation in a rapidly subsiding salt marsh by thin-layer deposition of dredged material [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(3/4): 189-205.
- [24] CHAPMAN M G, UNDERWOOD A J. Evaluation of ecological engineering of "armoured" shorelines to improve their value as habitat [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 400(1/2): 302-313.
- [25] HARTIG J H, ZARULL M A, COOK A. Soft shoreline engineering survey of ecological effectiveness [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(8): 1231-1238.
- [26] VANDENBRUWAENE W, MEIRE P, TEMMERMAN S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh [J]. *Geomorphology*, 2012, 151-152: 114-125.
- [27] ROMAN C T, NIERING W A, WARREN R S. Salt marsh vegetation change in response to tidal restriction [J]. *Environmental Management*, 1984, 8(2): 141-149.
- [28] VAN PROOSDIJ D, LUNDHOLM J, NEATT N, et al. Ecological re-engineering of a freshwater impoundment for salt marsh restoration in a hypertidal system [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1314-1332.
- [29] HAINES P. Hydrological modelling of tidal re-inundation of an estuarine wetland in south-eastern Australia [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 79-87.
- [30] BROOMES W, SENECA E D, WOODHOUSE JR W W. Tidal salt marsh restoration [J]. *Aquatic Botany*, 1988, 32(1/2): 1-22.
- [31] TEAL J M, WEINSTEIN M P. Ecological engineering, design, and construction considerations for marsh restorations in Delaware Bay, USA [J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18(5): 607-618.
- [32] Plum Island Ecosystems LTER. The Long Term Ecological Research Network [EB/OL]. 2014, <http://www.lternet.edu/sites/pie>.
- [33] ADAM P. Saltmarsh ecology [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1990.
- [34] LANGMAN O C, HALE J A, CORMACK C D, et al. Developing multimetric indices for monitoring ecological restoration progress in salt marshes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(4): 820-835.
- [35] IRVING D, CONNELL S D, RUSSELL B D. Restoring coastal plants to improve global carbon storage: reaping what we sow [J]. *PLoS One*, 2011, 6(3): 1-6.
- [36] CHMURA G L. What do we need to assess the sustainability of the tidal salt marsh carbon sink? [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 83: 25-31.
- [37] ROBERTSON M. Emerging ecosystem service markets; trends in a decade of entrepreneurial wetland banking [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(6): 297-302.