

浅海湿地生态系统恢复技术初探

刘伟¹, 但新球¹, 刘世好¹, 陈芙蓉², 吴协保¹

(1. 国家林业局中南林业调查规划设计院, 湖南长沙 410014; 2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 人类活动导致浅海海域富营养化加剧、海洋生境被破坏、浅海湿地生态系统退化和生物资源日益衰退。传统的浅海湿地生态系统修复模式仅限于单一生物修复技术, 本研究以浅海湿地生态修复原理为基础, 综述前人研究, 提出了关于浅海富营养化修复和生物资源恢复的关键设施和技术, 以期为中国退化浅海湿地生态系统恢复提供参考。

关键词: 浅海; 湿地生态系统; 富营养化; 生境; 生物资源

中图分类号: P76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2014)05-606-06

浅海湿地(水域)一般指湿地底部基质为无机部分组成, 植被盖度小于30%的近海区域, 多数情况下低潮时水深小于6 m, 包括海湾和海峡^[1]。随着中国社会、经济的高速发展和人口规模的逐渐增大, 大量富含氮、磷等富营养化物质的工业、农业、养殖业和生活废水通过河流、排污口直接或间接排入近海海域, 导致沿海水域的富营养化程度呈不断扩大和加重趋势^[2], 由此引发的赤潮频发、底层水体缺氧、生物物种减少和渔业资源破坏等一系列问题^[3,4], 不仅对近海生态环境带来严重影响, 而且也严重制约了中国沿海地区社会、经济的可持续发展。开发经济、有效的富营养化海域污染治理技术, 以有效消除富营养化物质, 恢复水体的综合功能, 已成为迫切需要解决的问题^[5]。

1 浅海湿地生态系统修复研究进展

迄今为止, 涉及浅海富营养化海域生物修复工作的报道并不多见。常用于海洋生态系统修复的海洋生物主要是海草等海洋植物和扇贝等海洋滤食性贝类。

海草大面积聚集生长在海岸潮下带、浅滩、潟湖和河口等^[6], 最大可形成面积达几十万公顷的海草场^[7], 构成一个庞大的海草场生态系统。海草场能降低来自波浪和水流的能量, 从而可以缓解海浪对海岸的侵蚀和改善水质。海草还可以改变沉

积物的沉积速率, 主要通过提高沉积物中的淤泥量来稳定底质。海草还可以通过其根和茎来增加沉积物的沉降速率, 对沉积物起到稳定作用^[8]。

国内外关于用海草来修复海水富营养化的研究已经有很多。研究表明, 海带(*Laminaria japonica*)、龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)、条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)等大型海藻在海洋生态系统碳循环和减缓海水富营养化方面具有很重要的作用, 大规模栽培大型海藻是减轻养殖区富营养化的有效途径之一^[9]; 龙须菜对福建省东山岛近海水产养殖区富营养化海水有良好的修复效果^[10]。用龙须菜、石莼(*Ulva lactuca*)和海带去除水产养殖废水中氮、磷营养盐的效果明显, 可用作大规模养殖废水的净化材料^[11,12]; 大型藻类生物滤器是控制水体富营养化、增进食品安全和对污染水体进行生物修复的有效措施之一^[13]; 龙须菜吸收厦门海域海水中的氮、磷效果相当显著^[14]; 栽培条斑紫菜可以降低整个海区的无机氮含量^[15]; 养殖紫菜是控制水质富营养化的措施之一^[16]。

日本“菊花A”条斑紫菜新品种被成功引入中国, 在胶州湾地区成功实现了育苗生产和海上裁培养殖, 条斑紫菜养殖可以降低海水富营养化程度和保持生态平衡, 具有良好的发展前景^[17]。条斑紫菜养殖对胶州湾湿地海水中过剩的营养盐有明显的控制作用, 条斑紫菜和龙须菜收获后, 每年可

收稿日期: 2013-12-20; 修订日期: 2014-07-10

基金项目: 全国湿地资源普查项目(2130212)资助。

作者简介: 刘伟(1985-), 男, 河南省信阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事湿地、石漠化调查研究和规划设计工作。E-mail: lwmax@163.com

以从海域中移出的氮、磷总量占整个胶州湾湿地海域水体中总氮和总磷含量的比例分别为18.55%和8.34%,水质营养指数降低了25.29,最优密切值由2.67降至1.92,水质富营养化等级由“中度富营养”降至“轻度富营养”^[18]。

扇贝(*Pectinidae* spp.)是滤食性动物,水体中的重金属会在贝类滤食过程中被摄入,形成重金属体内富集。重金属在贝类体内的生物富集随着暴露时间的延长而显著增加^[19,20],且不同贝类、不同重金属生物富集系数存在显著差异^[21,22]。扇贝体内不同组织蓄积重金属的能力不同,闭壳肌蓄积铜、锌的能力较强^[23,24]。

生境修复和海洋生物资源养护是海洋生态系统恢复的两个主要途径。生境修复主要对受损的生境进行恢复与重建,使其恶化状态得到改善。生物资源养护指通过人工途径恢复生物资源,使退化的生态系统得以改善^[25]。海洋生物资源养护又是海洋生态系统恢复的重要措施之一。

浅海湿地生态系统是海洋向内陆过渡的区域,也是世界上最复杂和最不稳定的生态系统。目前,由于科技水平的限制,缺乏有效的实验设备,人类对海洋生态系统与陆地生态系统之间的关系和相互作用机理的了解仍不够深入。目前,浅海湿地生态系统修复多采用单一技术单一物种修复模式,修复效果不明显,且持续时间较短;由于对浅海湿地生态系统退化的根本原因把握不准,容易造成修复方法选用不当等问题;浅海生态修复研究大多停留在小尺度、局部区域范围内,缺乏整体生态系统水平、大尺度的生态修复研究;生态修复多侧重于对生态末端治理,而从生态系统退化的源头出发进行生态修复研究的尚少。

本文综述了前人的相关研究,提出采用海草和滤食性贝类协同作用,对浅海湿地富营养化进行综合生物修复,为浅海湿地富营养化海域生物修复技术的建立提供技术支撑;同时,建议利用人工构建近海湿地生境和增加海洋物种资源的方式,来全面修复浅海湿地生态系统。

2 浅海湿地生态系统综合修复技术

现有的技术无法为浅海水域污染水体的治理提供有效的方法和可以实施的整体方案。一方面,富营养化海域的污染构成不仅仅包括无机营养盐,还有相当数量的有机污染物;另一方面,养

殖过程中残留的饵料碎屑和养殖动物所产生的粪便会不断沉积到水体底部,成为水体二次污染的重要来源。现有的修复手段往往采用单一修复生物,或只关注于无机营养盐的去除效果,或只关注于有机质的降解作用,或只关注悬浮碎屑的去除作用,缺乏不同修复生物之间的综合应用,以同时有效去除各类污染物。要从根本上减少养殖环境的富营养化和有机质污染,实现富营养化海区水质根本改善,需要利用综合生物修复技术,同时去除水体中富营养化物质和有机污染。

2.1 水体综合修复

在富营养化的浅海水域,采用大型海藻、滤食性贝类和固定化微生物对近海富营养化水体进行综合修复,构建以特定的复合菌剂(将亚硝化细菌、硝化细菌和有机质降解菌复配和固定化后,得到生物修复菌剂)、滤食性贝类[牡蛎(*Crassostrea gigas thunberg*)、扇贝或贻贝(*Mytilus* spp.)]和大型海藻[龙须菜、海带或裙带菜(*Undaria pinnatifida*)]为主体的富营养化海区综合生物修复体系。利用三类生物对富营养化水体的协同修复作用,达到有效去除海水中的富营养化物质的目的^[26-30]。采用的主要修复模式为贝类—藻类筏(架)式立体养殖技术^[31]。

在富营养化海域,将大型藻类的栽培和滤食性动物的养殖结合在一起,按一定比例再投以固定化菌剂,即通过栽培大型海藻和微生物去除水体中的溶解态氮、磷营养盐,同时通过养殖滤食性双壳贝类(牡蛎、扇贝、贻贝等)去除水体中的悬浮颗粒态氮磷营养物质。根据气温,先后栽培暖水性(耐高温)大型藻类[江蓠属(*Gracilaria*)龙须菜]和冷水性大型藻类(海带或裙带菜)。

2.2 浅海湿地生境构建

2.2.1 海草床修复

海草床广泛分布于热带到温带的大陆近岸海域,与珊瑚礁、红树林构成世界近海三大典型生态系统^[32],是许多大型海洋生物甚至哺乳动物赖以生存的栖息地,在海洋生态系统中具有重要意义。

海草床对海域生境的修复和改良具有重要的生态作用。海草群落不仅是海洋初级生产者,具有较高的生产力和固碳能力,还可起到稳定底泥沉积物、改善水体透明度和净化海水的作用。同时,海草还是许多海洋动物重要的产卵场、栖息地、隐蔽场所及直接的食物来源,在全球碳、氮、磷

循环中具有重要作用^[33-35]。近年来,由于自然因素和人类活动干扰,中国海草床出现严重的退化趋势^[36]。海草床作为底栖动植物、深海动植物、附生生物、浮游生物、细菌和寄生生物的栖息地,是海草场生态系统的重要组成部分^[37],因此海草床的恢复是浅海湿地生态系统恢复的重要环节之一。在海草床修复时,海草的选择尤为重要,根据浅海水域的具体情况,选择大叶藻(*Zostera marina*)、丛生大叶藻(*Zostera caespitosa*)、日本大叶藻(*Zostera japonica*)、黑须根虾形藻(*Phyllospadix japonicus*)和红须根虾形藻(*Phyllospadix iwatensis*)等适生藻类。海草床恢复重建技术路线详见图1。

在调查研究的基础上,揭示造成海草床退化的胁迫因子,根据实际情况制定出海草床的恢复方案,是浅海湿地生态系统恢复时需要解决的关键问题之一。

2.2.2 人工礁体恢复技术

浅海湿地生境的构建除了恢复天然的海草床,还包括通过投放人工礁体来恢复海洋生物的生境。人工礁体生境可分为资源恢复型人工鱼礁区、海珍品增殖礁区和埋栖性贝类底播增殖区三类。根据海域底质环境特点,区域布局采用嵌套布局。在淤泥质、砂石和岩石底质的海域,嵌套投放单体礁、五层组合式海珍礁和集束式海珍礁。

单体礁。方形箱体水泥造礁。设计制作方形

水泥礁体,边长2 m,每个面有5个孔洞,便于鱼类藏匿。制作专用模具,一次浇注成型。制作完成后,将礁体批量用驳船运送至目标海域投放。

五层组合式海珍礁。制作组合式多层水泥板礁体,专门用作刺参(*Oplopanax elatus*)等海珍品增殖,礁体的立柱与五层板分别制作,最后,用简易吊装设备组装成型,用船载吊车平稳放至海底。

集束式海珍礁。采用环保亚麻绳网兜,网孔边长10 cm,内装大块石,单块石重量100~300 kg,单体礁重量5 t左右。投放时,用专用驳船运至目标海域,用船载吊车放至海底。

2.3 浅海海洋生物资源修复

2.3.1 人工增殖放流

增殖放流是恢复渔业资源、优化水生生物群落结构、提高渔业生产力的有效手段,其形式是通过向天然水域投放鱼、虾、蟹和贝等各类渔业生物的苗种,来达到恢复或增加渔业资源种群数量和资源量的一种方法^[38,39]。中国已有对虾(*Penaeus orientalis*)、海蜇(*Rhopilema esculenta*)、虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)的移植和增殖成功案例,并且具有了一定的生产规模^[40,41]。

为了增加海洋生物多样性,加强生态系统的稳定性,根据区域特点,在海草床和人工礁体恢复区有选择性的底播对虾、海蜇、扇贝、魁蚶(*Scapharca broughtonii*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)和栉

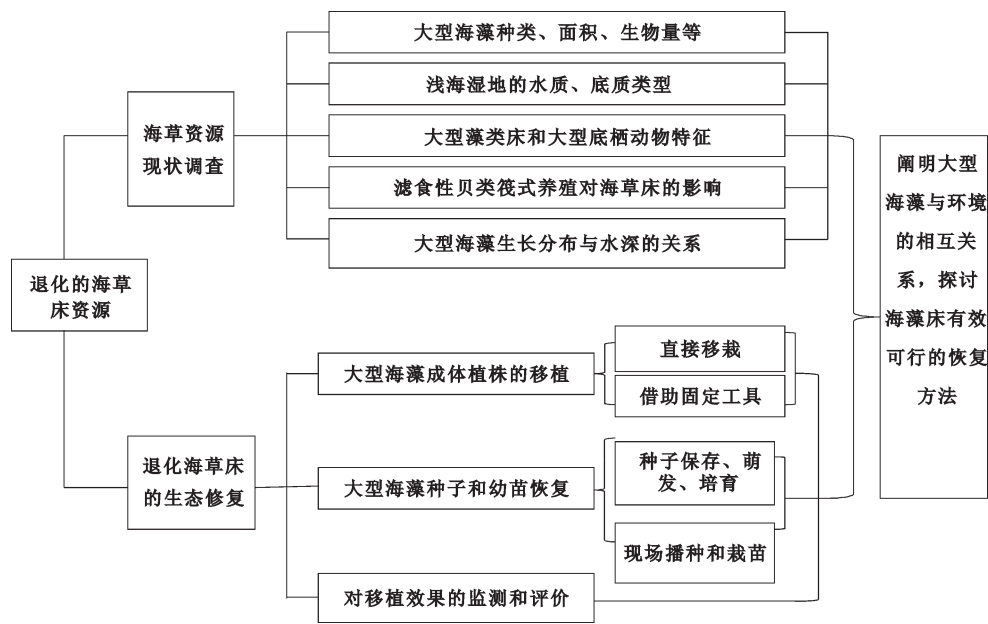


图1 海草床恢复重建技术路线

Fig.1 Technical route of sea grass bed restoration

江珽(*Atrina pectinata*)等海洋生物。为了恢复浅海水域的海洋生物种群及数量,在整个海域开展鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)、梭鱼(*Liza haematocheila*)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、黑裙(*Gephyrocharax melanocheir*)、半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)、对虾、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、海蜇等本土珍稀海洋生物的大规模增殖放流活动,显著补充自然种群资源,增加自然海区的渔业资源数量,为浅海湿地生态系统的健康发展提供保证。

2.3.2 多元生态增殖模式构建

多元生态增殖模式又称为多营养级的综合养殖模式,对于资源稳定、守恒的系统,营养物质的再循环是生态系统中的一个重要过程,由不同营养级生物(如投饵类动物、滤食性贝类、大型藻类和沉积食性动物等)组成的综合养殖系统中,系统中一些生物排泄到水体中的废物成为另一些生物的营养物质来源。因此,这种方式能充分利用输入到养殖系统中的营养物质和能量,可以把营养损耗及潜在的经济损耗降到最低,从而使系统具有较高的容纳量和经济产出^[25,42]。

人工鱼礁区采用贝类——藻类筏(架)式立体养殖技术,并放养适当海洋鱼类。海珍品增殖礁区采用多元生态增殖示范区,建立大型藻类、鲍鱼(*Haliotis* spp.)、海参(*Isostichopus* spp.)综合增殖模式,礁区建设成为自然鱼类良好的索饵场和育幼场,吸引鱼苗在此区域聚集,构建基于生态系统的健康增殖系统。埋栖性贝类底播增殖区同时进行大型藻类(龙须菜、裙带菜)沉绳式底播养殖,增加底部饵料供应量,促进贝类的生长。

2.4 浅海湿地生态系统恢复技术路线

主要从浅海湿地水质恢复、浅海湿地生境构建和海洋生物资源多样性保护方面保障湿地生态系统的稳定发展。浅海湿地生态系统综合修复的具体技术路线为:①针对浅海湿地的水资源、底质状况、生物群落等情况进行本底调查;②根据浅海湿地资源相关因素的现状调查对各个湿地进行诊断分析,判断湿地退化的状况和程度,为更有效的生态恢复和重建提供依据;③根据诊断结果找出限制因子,确定合理的生态恢复目标;④根据诊断结果和确定的恢复目标,提出生态恢复工程的实

施方案,进行浅海湿地生态系统恢复(图2)。

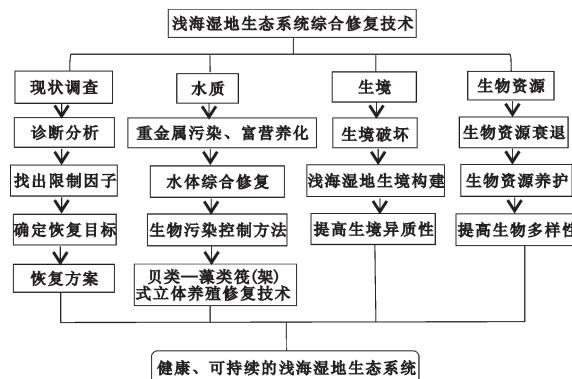


图2 浅海湿地生态系统恢复技术路线

Fig.2 Technical route of shallow sea ecosystem restoration

3 结语

利用浅海湿地富营养化综合生物修复技术,一方面综合考虑了浅海富营养化形成的原因,在治理过程中一并去掉富营养化水体中溶解态和悬浮态的有机污染物和无机营养盐;另一方面从生态系统的层次对退化浅海湿地进行治理,兼顾生态系统的生物因子和环境因子,实现大范围治理的效果。

由于综合治理过程中需要大量扇贝和藻类产品,因此在实际操作中可以与当地渔民合作,即达到治理目的,又能增加当地渔民经济收入,从而实现综合生物修复技术长期治理的效果。

参考文献

- [1]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准 GB/T 24708—2009 湿地分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2]甘华阳,张顺之,梁开,等. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价[J]. 湿地科学, 2012, **10**(3): 285~298.
- [3]徐东霞,章光新. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策[J]. 湿地科学, 2007, **5**(3): 282~288.
- [4]雷 昆,张明祥. 中国的湿地资源及其保护建议[J]. 湿地科学, 2005, **3**(2): 81~86.
- [5]姜培霞. 近海富营养化水体综合生物修复技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [6]Green E P, Short F T. World Atlas of Seagrasses[M]. California: University of California Press, 2003: 1-298.
- [7]Fonseca M S, Kenworthy W J, Courtney F X. Development of planted seagrass beds in Tampa Bay, Florida, USA: I. Plant components[J]. Marine Ecological Progress Series, 1996, **132**(1): 127-139.
- [8]Larkum A W D, Orth R J, Duarte C M. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation[J]. The Netherlands: Springer, 2006: 1-691.
- [9]杨宇峰,费修纆. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, **33**(1): 53~57.
- [10]汤坤贤,游秀萍,林亚森,等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. 生态学报, 2005, **25**(11): 3 044~3 051.
- [11]曲克明,卜雪峰,马绍赛. 贝藻处理工厂化养殖废水的研究[J]. 海洋水产研究, 2006, **27**(4): 36~43.
- [12]赵先庭,刘云凌,张继辉,等. 龙须菜处理海水养殖废水的初步研究[J]. 海洋水产研究, 2007, **28**(2): 23~27.
- [13]毛玉泽,杨红生,王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用[J]. 中国水产科学, 2005, **12**(2): 225~231.
- [14]郑杰民. 应用龙须菜降低厦门海域海水中氮、磷的初步研究[J]. 福建水产, 2009, (4): 39~43.
- [15]张寒野,何培民,陈婵飞,等. 条斑紫菜养殖对海区中无机氮浓度影响[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(4): 44~45.
- [16]杨晓玲,郭金耀. 条斑紫菜对高浓度氮、磷的耐受性研究[J]. 水产科学, 2008, **27**(12): 655~657.
- [17]刘 瑜,纪培福. 新品种条斑紫菜的养殖技术[J]. 齐鲁渔业, 2007, **24**(12): 18~19.
- [18]陈聚法,赵俊,过锋,等. 条斑紫菜对胶州湾湿地浅海富营养化状况的生物修复效果[J]. 渔业科学进展, 2012, **33**(1): 93~101.
- [19]徐 韧,杨 颖,李志恩. 海洋环境中重金属在贝类体内的蓄积分析[J]. 海洋通报, 2007, **26**(5): 117~120.
- [20]陈海刚,林 钦,蔡文贵,等. 3种常见海洋贝类对重金属Hg、Pb和Cd的积累与释放特征比较[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(3): 1163~1167.
- [21]Kenaga E E. Predicted bioconcentration factors and soil sorption coefficients of pesticides and other chemicals[J]. Ecotoxicol Environ Safety, 1980, **4**(1): 26-38.
- [22]Bustamante P, Miramand P. Subcellular and body distributions of 17 trace elements in the variegated *Scallop chlamysvaria* from the French coast of the Bay of Biscay[J]. Sci. Total Environ., 2005, **337**(1-3): 59-73.
- [23]庞艳华,姜伟,薛大方,等. 大连沿海虾夷扇贝体内重金属含量研究与质量评价[J]. 水产科学, 2012, **31**(3): 156~159.
- [24]庞艳华,隋凯,王秋艳,等. 大连近岸海域双壳类重金属污染调查与评价[J]. 海洋环境科学, 2012, **31**(3): 410~413.
- [25]张立斌,杨红生. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望[J]. 生命科学, 2012, **24**(9): 1 062~1 069.
- [26]周岩岩,李纯厚,陈丕茂,等. 龙须菜海藻场构建及其对水环境因子的影响[J]. 生态科学, 2011, **30**(6): 590~595.
- [27]徐智广,邹定辉,高昆山,等. 不同温度、光照强度和硝氮浓度下龙须菜对无机磷吸收的影响[J]. 水产学报, 2011, **35**(7): 1 023~1 029.
- [28]邹定辉,夏建荣. 大型海藻的营养盐代谢及其与近岸海域富营养化的关系[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(3): 589~595.
- [29]李恒,李美真,曹婧,等. 温度对几种大型海藻硝氮吸收及其生长的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, **34**(1): 159~165.
- [30]黄瑶,毛玉泽,周毅,等. 添加氮磷对龙须菜光合固碳能力影响的现场研究[J]. 渔业科学进展, 2013, **34**(1): 22~30.
- [31]中国科学院海洋研究所. 一种温带富营养化海域的综合生态修复方法: 中国, 200510136775.2[P]. 2007-07-04.
- [32]Short F T, Wyllie- Echeverria S. Natural and human- induced disturbance of seagrasses[J]. Environmental Conservation, 1996, **23**(1): 17-27.
- [33]Hemminga M A, Duarte C M. Seagrass ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [34]Duarte C M. The future of seagrass meadows[J]. Environmental Conservation, 2002, **29**(2): 192-206.
- [35]韩秋影,施平. 海草生态学研究进展[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5 561~5 570.
- [36]许占洲,罗勇,朱艾嘉,等. 海草床生态系统的退化及其恢复[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(12): 2 613~2 618.
- [37]潘金华,江鑫,赛珊,等. 海草场生态系统及其修复研究进展[J]. 生态学报, 2012, **32**(19): 6 223~6 232.
- [38]刘莉莉,万荣,段媛媛,等. 山东省海洋渔业资源增殖放流及其渔业效益[J]. 海洋湖沼通报, 2008, (4): 91~98.
- [39]王晓梅,张彬,杨文波,等. 水生生物增殖放流效益的实现分析[J]. 中国渔业经济, 2010, **28**(1): 82~90.
- [40]赵兴武. 大力发展增殖放流努力建设现代渔业[J]. 中国水产, 2008, (4): 3~4.
- [41]张澄茂,叶泉土. 东吾洋中国对虾小规格仔虾种苗放流技术及其增殖效果[J]. 水产学报, 2000, **24**(2): 134~139.
- [42]方建光,唐启升. 实施多营养层次综合养殖 构建海洋生态安全屏障[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(增刊): 5.

Preliminary Research on Technology of Restoration of Shallow Sea Wetland Ecosystem

LIU Wei¹, DAN Xin-qiu¹, LIU Shi-hao¹, CHEN Fu-rong², WU Xie-bao¹

(1. *Central South Forest Inventory and Planning Institute of State Forestry Administration, Changsha 410014, Hunan, P.R.China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, P.R.China)*

Abstract: Recently, human activities become frequently that lead to the eutrophication, the destruction of marine habitat, the degradation shallow sea ecosystem and the growing recession of biological resources in shallow sea. Traditionally, the eco-restoration mode of shallow sea wetland was limited to single bioremediation technology. Base on the theory of ecological restoration, the idea about the essential facility and key technology on the restoration of shallow sea wetland habitat and the conservation of biological resources in shallow sea were put forward in this paper, so as to provide the reference to marine habitat restoration and conservation of biological resources in China. Shallow sea wetland was chosen as the research subject and technical route of ecological restoration and reconstruction in the region of shallow sea wetland was proposed in the paper. Three measures, including water quality restoration, habitat construction and protection of marine biodiversity, were proposed to guarantee the stability and development of the shallow sea wetland ecosystems. The details of technical routine were that to do background investigation on water resource, substrate conditions and biocenosis of shallow sea wetland; to carry on diagnostic analysis of wetland condition according to the relative factors of shallow sea wetland resources which were got in the status survey; to judge the status and extent of wetland degradation; to propose more effective ecological restoration and reconstruction technology; to find the restriction factor and determine the reasonable ecological restoration target according to the diagnosis; to propose the implementation plan of ecological restoration engineering and recover the shallow sea wetland ecosystems according to the diagnosis and restoration target.

Keywords: shallow sea; wetland ecosystem; eutrophication; habitat; biological resources