

入海河口退化生境阶梯式生态修复策略构想*

A Stepwise Strategy for Ecological Restoration of Degraded Estuary Areas

付晚涛¹,刘正一²,秦松^{2**}

FU Wan-tao¹, LIU Zheng-yi², QIN Song²

(1. 大连海洋大学, 辽宁大连 116023; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

(1. Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning, 116023, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai, Shandong, 264003, China)

摘要:基于河口生态系统的结构与功能,结合近年来中国主要河流入海污染物的主要种类及含量,提出入海河口生境阶梯式生态修复策略,主要包含:河口“上游段—中游段—下游段”纵向阶梯式生态修复技术体系;河口各段“潮上带—潮间带—潮下带”横向阶梯式生态修复技术体系;污染物在河口从上至下各段(上游段—中游段—下游段)各带(潮上带—潮间带—潮下带)阶梯式消减技术体系;“污染物源头处理—河口污染物生态修复”阶梯式生态修复技术策略。并对这些策略给予理论论证,为构建入海河口生态修复技术体系,消减陆源污染物经河口进入海洋提供新思路。

关键词:河口退化生境 陆源污染 阶梯式生态修复

中图分类号:P76 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)06-0569-04

Abstract: A stepwise strategy for ecological restoration of estuary areas was proposed in this paper, by which land-originated pollutants from river into the sea could be significantly eliminated. The concept of “stepwise ecological restoration” of estuary areas was analyzed and demonstrated theoretically. This strategy proposed an integrated stepwise tech-system for ecological restoration of estuary areas, including longitudinal (upstream-midstream-downstream) restoration technology, transversal (uppertidal-intertidal-subtidal zone) restoration technology, integrated systems of both longitudinal and transversal restorations, and integrated technology of both elimination of pollutants at the origins and successively restoration at estuary mouth. This paper provided a new insight and theoretical model of stepwise ecological restoration tech-systems of estuary areas by eliminating land-originated pollutants into the sea.

Key words: degraded estuary ecosystem, land-originated pollutants, stepwise ecological restoration

1 入海河口的环境问题

河口是淡水和海水交汇处,是地球上淡水和海水

两类生态系统之间的过渡区^[1]。通常将河口分为河口上游段、河口中游段、河口下游段。河口既是重要的渔业捕捞场所,也是重要的水产养殖区。同时河口能够截留陆源输入的污染物、营养物质,阻止其流向海洋,具有“过滤器”的作用。近年来,随着河流沿岸工业快速发展、规模不断扩大,人们生活水平日益提高,产生的大量污染物经河流排放入海。2013年全国监测的72条河流入海监测断面水质劣于第V类地表水水质标准的比例分别为68%(枯水期)、44%(丰水期)和51%(平水期),与2012年相比,枯水期和平水期比例分别增加18%和6%,丰水期比例降低

收稿日期:2014-10-10

修回日期:2014-12-31

作者简介:付晚涛(1969-),男,博士,教授,主要从事海洋环境学研究。

* 国家科技支撑计划项目“海洋生物资源综合利用技术”(2013BAB01B0)资助。

** 通信作者:秦松(1968-),男,博士,研究员,主要从事海洋生物技术研究,E-mail:sqin@yic.ac.cn。

7%，污染要素主要为化学需氧量(COD_{Cr})、总磷、氨氮和石油类^[2]。由此，2013年实施监测的入海河口生态系统，包括双台子河口、滦河口-北戴河口、黄河口、长江口、珠江口等全部处于亚健康状况^[2]。可见，河口生态系统不但难以发挥截留陆源污染物入海的作用，反而成为陆源污染物进入海洋的主要渠道，而且其自身生态系统也由于陆源污染物的作用而逐渐退化^[3]。同时，河水携带的泥沙不断改变着河口区域的地形地貌，围垦填海、大型水利工程等人类活动显著加速了河口生态系统退化。因此，修复河口生态系统，恢复其健康状态具有重要的生态价值和经济价值^[4]。

2009年，宋晓林等^[5]总结了我国退化河口湿地生态恢复研究进展，归纳了水禽生境恢复、红树林生境恢复等几种恢复方法，认为国内对河口退化湿地恢复与修复的研究较少，多处于理论阶段，主要集中在湿地植被系统及栖息地功能的恢复等方面，除红树林的恢复研究成果较成熟地应用于实践之外，其它研究大多停留在理论研究阶段。随着国家对河口生态环境问题的重视，该领域的研究取得了一定进展，如在河口上游段实施怪柳(*Tamarix chinensis*)生态修复技术研究^[6]，研究盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)在河口中游段生态修复技术及示范^[7]，参考国外河口下游段海草生态修复技术^[8]并结合河口海草通常生长在浅海和河口水域的特性^[4]，研究海草移植与播种技术以对河口下游段进行生态修复的关键技术^[9]。针对河口淤泥、泥沙不断堆积问题，2011年黄华梅等^[10]提出了疏浚泥用于河口湿地的生态保育，稳定侵蚀性海岸的设想。以上研究为我国河口生态修复提供了重要的基础资料。

迄今为止，入海河口生态修复研究及工程实施基本以单一技术手段分别研究解决河口的上游段、中游段、下游段的某一具体环境污染问题或生态问题，而针对河口全流域的系统性综合修复河口生态系统的策略构想尚无相关报道。入海河口生态系统包括以淡水为主、但受海水潮汐影响的上游段，咸淡水混合的中游段和海水逐步为主的下游段，而且每段包含潮上带、潮间带和潮下带。每一段、每一带既是独立的生态系统，又是河口生态系统这一整体的有机部分，其生态位差异较大。尽管从河口入海的污染要素主要为化学需氧量、总磷、氨氮和石油类等，但构成化学需氧量的污染物种类繁多，石油类也是由多种长碳链污染物组成，然而某一特定的生物修复工具种(如盐地碱蓬、怪柳等)据其生态位特征仅能够较好地吸收利用或富集某一种或几种污染物；再者，即使是适宜

的生物修复种，若水体中污染物含量过高，甚至超出其耐受的阈值范围，则其种群也会逐渐衰退，如海水富营养化导致海草种群的衰退。这在客观上要求研究者基于河口岸段不同生物种群的生态位特征差异性，提出构建河口生态修复的策略，并先从理论上予以可行性论证。

2 入海河口生境阶梯式生态修复策略

基于河口生态系统的结构与功能，结合近年来中国主要河流入海污染物的主要种类及含量，提出河口生境阶梯式生态修复策略，主要包含4个策略。

2.1 河口“上游段—中游段—下游段”纵向阶梯式生态修复技术体系

如图1所示，河口纵向阶梯式生态修复技术体系包括上游、中游和下游3个部分，并分别以潮上带、潮间带和潮下带为主要修复区。

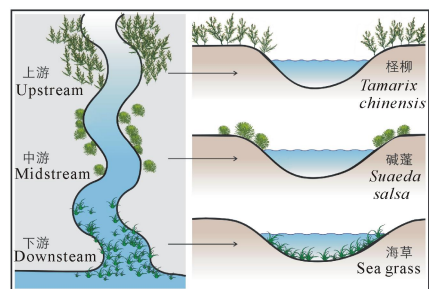


图1 河口纵向阶梯式生态修复技术体系

Fig. 1 Longitudinal (upstream-midstream-downstream) restoration technology

首先，河口的上游段是承受整条河流泥沙冲刷、河水侵蚀的首要地段，在上游段两岸潮上带应构建具有防治水土流失的木本植物，如在北方的怪柳、南方的红树等，有些河口上游段(如大连复州河河口上游段)基于以砂质为主的沿岸土壤特征，种植了大量的梨树、苹果树等耐砂植被，很好地保护了河口上游段岸线原貌，并减少泥沙对河口中游段和下游段的冲击。同时，河口上游段潮上带大型植物不仅具有抵御河水中泥沙冲击、防治水土流失的功能，还可有效吸收河水中(通过径流水体进入潮上带土壤中)无机营养盐的作用，减少总氮、总磷等污染物对河口中游段和下游段植被的压力。

第二，河口中游段的潮间带频繁承受着潮汐影响，受到淡水和海水的共同作用，因此中游段潮间带植被在河口生态系统中承担着“缓冲器”作用，同时潮间带植被既能阻止河口河道水土流失，又能很好吸收利用并转化水体中污染物，如双台子河口潮间带优势种-盐地碱蓬种群不但能很好地吸收利用入海河水中无机氮磷盐，而且盐地碱蓬根系与潮间带底栖微生物

之间形成的生物群落也具有较好的降解石油类污染物的功能。同样,在南方红树林群落中的微生物也具有很好地降解石油类污染物的功能。

第三,河口下游段受海水影响较大,经过上游段和下游段植被的吸收利用,这里的营养盐丰富但不过剩,适宜被海草吸收利用并转化为海草生物量,形成海草床生态系统,既提高了河口下游段涵养能力,又为鱼虾贝类等海洋经济动物提供重要的栖息地和产卵场。如广泛分布在渤海河口的海草床生态系统。但近十几年来河口岸带大型工程和填海造地活动的开展,已经导致渤海河口海草床生态系统几近丧失,这也是渤海名贵经济物种如渤海刀鱼、渤海对虾等几乎绝迹的主要原因(由于栖息地和产卵场丧失,增殖放流苗方式无法有效解决)。

2.2 河口各段“潮上带—潮间带—潮下带”横向阶梯式生态修复技术体系

以河口下游段为例,如图2所示,双台子河河口下游段,其潮上带以芦苇种群为主、潮间带以盐地碱蓬种群为主、潮下带以海草种群为主(现已很少见,但历史上海草是其优势种),可以分别以这3个工具种构建横向阶梯式生态修复体系。在河口上游段和下游段,同样可以通过选择适合各自环境的本地优势种为生物修复工具种,来构建类似的横向阶梯式修复体系。

借鉴入湖河流污染物净化的研究经验^[11],在上游、中游和下游的河道内分别根据环境特征选择当地适宜的挺水植物、浮水植物和沉水植物工具种构建不同生态位的优势群落,形成多层次的水生植物结构,可显著减少水体中的污染物,改善河流的净化能力。

此外,工具种的选择与搭配对修复效果具有较大影响。第一,水生植物主要包括水生维管植物和水生藻类^[12],由于河口地区多为泥沙为主的软质基底,缺少藻类附着生长所需要的硬质基底,因此以维管植物作为工具种更为适宜,同时维管植物发达的根系还具有固岸的作用。第二,可能造成的生物入侵等生态安全问题也需要考虑,在工具种的选择上以本地种优先,或选择不留生态安全隐患的物种。如2014年浙江“五水共治”项目中使用的狐尾藻,其长势由水体富营养化程度所决定,可大量吸收水体中的氮和磷元素,但是在水质好转后会自然枯萎。第三,由于各工具种的生态位不同,以及在生境喜好、对不同性质污染物的吸收降解能力等方面的差异,可通过不同工具种之间的生物互作形成良好的微环境^[13],有效提高修复效果,规避单一修复种的弊端。

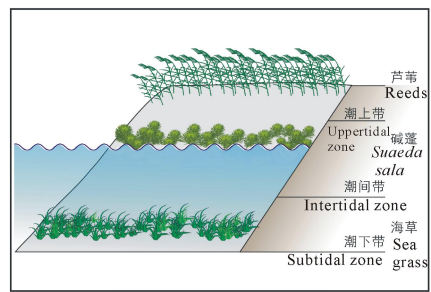


图2 河口下游段横向阶梯式生态修复技术体系
Fig. 2 Transversal (uppertidal-intertidal-subtidal zone) restoration technology

2.3 污染物在河口(上游段—中游段—下游段)各带(潮上带—潮间带—潮下带)阶梯式消减与转化利用的技术体系

国内外的河流生态修复研究均经历了从对河流形态到河流功能、过程和动力学的修复;从针对某特定河流的小尺度修复到河流生态系统乃至全流域的大尺度修复;从简单的工程修复到河流整体修复的发展过程^[14],本文所提出的阶梯式修复策略即旨在构建一个完整的修复体系。

如图3所示,通过上述提出并构建的河口阶梯式(纵向和横向)生态修复体系能够逐级地消减污染物,有效降低污染物对单一种群的压力,形成阶梯式消减污染物并增加修复植物生物量的修复技术体系,逐步消减并阻断陆源污染物经河口进入海洋。

由于河流各部分自然资源条件与功能定位的空间差异性,功能分区是进行科学生态修复的前提^[15]。因此在河口区的生态修复中除了按上、中、下游进行区分外,还需参考诸多界点标准,如永定河北京段河流修复生态功能分区即综合了规划界点、生态界点和调研界点,划分为官厅山峡—自然段、官厅山峡—近自然段、城市景观—防洪段、城市景观—绿化段、郊野—人工绿化段和郊野—自然绿化段6部分。在阶梯式生态修复中,参考目的河段的功能定位和环境条件也是工具种选择和使用方案的重要参考依据。

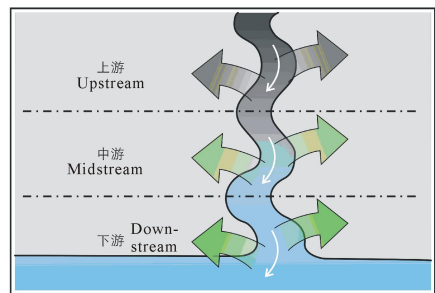


图3 污染物阶梯式消减与转化利用体系
Fig. 3 Integrated system of both longitudinal and transversal restorations

2.4 “污染物源头处理—河口污染物生态修复”阶梯式生态修复技术模式

如图4所示,在植物优势种为单一的河口生态系统,某种污染物的持续压力会造成生物种群的迅速衰退乃至绝迹。如双台子河口石油类污染物的持续污染导致河口盐地碱蓬种群的不断衰退,该类污染的治理要联合河流全流域的环保监管部门,确定石油类污染物主要来源,分别在污染物源头建立处理站(厂),减少石油类等污染物进入双台子河,减轻其对河口盐地碱蓬生物种群的压力,并在河口区域建立盐地碱蓬根系与潮间带底栖微生物之间形成的生物群落降解水体中低含量石油类污染物的生态修复体系,进而形成“污染物源头处理—河口污染物生态修复”的阶梯式生态修复技术模式。

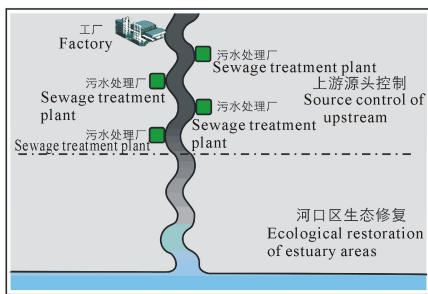


图4 “污染物源头处理—河口污染物生态修复”阶梯式生态修复技术策略

Fig. 4 Integrated technology of both elimination of pollutants at the origins and successively restoration at estuary mouth

3 结束语

海岸带和河岸带都为水陆交汇区域,虽然二者从不同学术角度均有多种定义,但复杂的理化条件和生物组成、分布的层次性是其共有的特性。入海河口生境兼具海岸带和河岸带的性质,同时也是受人类活动影响严重,生态健康较为脆弱的区域。受两种岸带分层特征的启发。本文提出了入海河口退化生境阶梯式生态修复策略,并阐述了基本的实施方式,为构建河口生态修复技术体系,消减陆源污染物经河口进入海洋提供了创新模式。同时,生态修复后评估,包括河流整治的投入产出分析、修复效果公众调查和生态调查与评估等^[16]是这一策略实施的重要后续工作。在后续研究中需根据以上评估结果对实施方案加以及时调整,以保障理想的修复效果。

参考文献:

[1] 沈国英,黄凌风,郭丰,等. 海洋生态学[M]. 北京: 科学

出版社,2010.

Shen G Y, Huang L F, Guo F, et al. Marine Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[2] 中国国家海洋局. 2013年中国海洋环境状况公报[EB/OL]. 国家海洋局网站, [2014-03-24]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlg/201403/t20140324_31065.html.

Chinese State Oceanic Administration. State of the marine environment of China's bulletin in 2013[EB/OL]. China Oceanic Information Network, [2014-03-24]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlg/201403/t20140324_31065.html.

[3] 张婧. 胶州湾娄山河口退化滨海湿地的生态修复[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

Zhang J. Ecological Restoration on Wet Land of the Loushan River Estuary, Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Chinese Ocean University, 2006.

[4] 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[J]. 生命科学, 2012, 24(9): 1062-1069.

Zhang L B, Yang H S. Advances in principles and techniques of marine habitat restoration and biological resource conservation [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2012, 24(9): 1062-1069.

[5] 宋晓林,吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. 湿地科学, 2009, 7(4): 379-384.

Song X L, Lu X G. A review on the ecological restoration of degraded estuarine wetlands in China [J]. Wetland Science, 2009, 7(4): 379-384.

[6] 封晓辉,张秀梅,刘小京,等. 滨海重盐碱地人工栽植柃柳生长动态及生态效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1233-1240.

Feng X H, Zhang X M, Liu X J, et al. Growth dynamics of *Tamarix chinensis* plantations in heavy-saline coastal lands and related ecological effects [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(10): 1233-1240.

[7] 管博,于君宝,陆兆华,等. 黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬的生态修复效果[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4835-4840.

Guan B, Yu J B, Lu Z H, et al. The ecological effects of *Suaeda salsa* on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4835-4840.

[8] Balestri E, Piazzini L, Cinelli F. Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L. Delile) in a damaged coastal area [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1998, 228(2): 209-225.

[9] 张沛东,曾星,孙燕,等. 海草植株移植方法的研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(5): 100-107.

Zhang P D, Zeng X, Sun Y, et al. Research progress in seagrass shoot transplanting method [J]. Marine Science, 2013, 37(5): 100-107.

(下转第 586 页 Continue on page 586)

和海生束藻 *Symploca hydroides*。南海北区和南海南区共有种类为 9 种,即粘状缩毛藻 *Blennothrix cantharidosma*、粘滑眉藻 *Calothrix contarenii*、斑点褶丝藻 *Kyrtuthrix maculans*、易氏鞘丝藻 *Lyngbya aestuarii*、贝生鞭鞘藻 *Mastigocoleus testarum*、丰裕席藻 *Phormidium limosum*、胞内植生藻 *Richelia intracellularis*、汉氏束毛藻 *Trichodesmium hildebrandtii*、多变三离藻 *Trichormus variabilis*。

3 结束语

根据物种及其分布信息可以判断,我国海洋蓝藻的研究存在严重不均衡性,过去的研究工作主要集中在南中国海沿岸,在此海域所报道的物种数远超过黄、东海沿岸。如果从我国三大海区(黄渤海、东中国海和南中国海)的蓝藻种数来说,即黄渤海 29 种,东中国海 18 种,南中国海 148 种,也反映了这种不均衡性。然而即使在南中国海,其研究也并不全面,研究海域主要集中在香港和西沙群岛的。由此可见,要真实地反映我国海洋蓝藻生物多样性全貌,需要更系统更全面的研究。

参考文献:

[1] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京:科学出版社, 2008.
Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M].

Beijing: Science Press, 2008.

[2] Nagarkar S. New records of marine Cyanobacteria from rocky shores of Hong Kong[J]. *Botanica Marina*, 1998, 41:527-542.
[3] Nagarkar S, Williams G A. Spatial and temporal variation of cyanobacteria-dominated epilithic communities on a tropical shore in Hong Kong[J]. *Phycologia*, 1999, 38:385-393.
[4] Nagarkar S. New records of intertidal epilithic Cyanobacteria from Hong Kong shores[J]. *Algae*, 2001, 16(4):343-348.
[5] Nagarkar S. Morphology and ecology of new records of Cyanobacteria belonging to the genus *Oscillatoria* from Hong Kong rocky shores[J]. *Botanica Marina*, 2002, 45: 274-283.
[6] 丁兰平. 中国海洋蓝藻门名录. 中国生物物种名录(2014 版)[M/OL]. http://base.sp2000.cn/colchina_c14/search.ph
Ding L P. Marine Cyanophyta. Catalogue of Life China, 2014 Annual Checklist[M/OL]. http://base.sp2000.cn/colchina_c14/search.ph
[7] 丁兰平,黄冰心,谢艳齐. 中国大型海藻的研究现状及其存在的问题[J]. *生物多样性*, 2011, 19(6):798-804.
Ding L P, Huang B X, Xie Y Q. Advances and problems with the study of marine macroalgae of China seas[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6):798-804.

(责任编辑:尹 闯 米慧芝)

(上接第 572 页 Continue from page 572)

[10] 黄华梅,谢健,娄全胜,等. 利用疏浚泥修复和重建滨海湿地案例分析及在我国的应用前景[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(6):866-871.
Huang H M, Xie J, Lou Q S, et al. Case studies for coastal ecological engineering using dredged marine sediments and potential application prospects in China [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(6):866-871.
[11] 张振兴. 北方中小河流生态修复方法及案例研究[D]. 长春:东北师范大学, 2012.
Zhang Z X. Study on River Restoration Methods and Cases Study for Medium and Small Rivers in North [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
[12] 王德华. 水上植物的定义与适应[J]. *生物学通报*, 1994, 29(6):10.
Wang D H. The definition and adaptation of aquatic plants[J]. *Bulletin of Biology*, 1994, 29(6):10.
[13] 刘伟,陈庆锋,马君健,等. 农业面源污染治理中水生植物的应用及生态工程模式[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(35):17665-17667.
Liu W, Chen Q F, Ma J J, et al. Application of hydrophyte in agricultural non-point source pollution control

and its ecological engineering mode[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(35):17665-17667.
[14] 徐菲,王永刚,张楠,等. 河流生态修复相关研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):515-520.
Xu F, Wang Y G, Zhang N, et al. Advances in the assessment of river ecological restoration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3):515-520.
[15] 吴建寨,赵桂慎,刘俊国,等. 生态修复目标导向的河流生态功能分区初探[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1843-1850.
Wu J Z, Zhao G S, Liu J G, et al. River eco-regionalization oriented by ecological restoration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9):1843-1850.
[16] 陈兴茹. 河流生态修复后评估研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(5):89-94.
Chen X R. Advances in post evaluation of river ecological restorations[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(5):89-94.

(责任编辑:陆 雁)