

沿海水域生态修复研究进展

高 强¹, 苟露峰¹, 高乐华^{1,2}

(1. 中国海洋大学管理学院, 山东青岛 266100;
2. 中国海洋大学文学与新闻传播学院, 山东青岛 266100)

摘要: 受人类活动和气候变化的影响, 沿海水域的生态系统受到了严重破坏, 海洋生物资源衰竭已成为最重要的海洋生态环境问题, 威胁到沿海经济的可持续发展。针对沿海生态系统面临的严峻问题, 综述了基于植物、微生物以及生物工程技术在海域生态修复研究进展, 探讨了这些技术措施存在的问题与不足。同时指出, 在充分利用海洋的自我修复能力的基础上, 应采取强化整治、修复和其他人工工程措施, 加速海洋生态系统功能的恢复。最后, 对沿海水域生态修复技术的发展趋势做出了展望。

关键词: 环境生态学; 沿海水域; 综述; 生态修复; 微生物; 植物

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2015)24-2522-08

Research progress on ecological remediation of coastal waters

GAO Qiang¹, GOU Lufeng¹, GAO Lehua^{1,2}

(1. Management College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;
2. Literature and Journalism College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Affected by human activities and climate change, coastal waters ecosystems have been seriously damaged. The exhaustion of marine biological resources has become the most important marine ecological problems, threatening the sustainable development of coastal economic issues. For acute problems faced by coastal ecosystems, this paper reviewed the marine ecological restoration research progress in plant, micro-organisms and biotechnology, discussed the existing problems and shortcomings of these measures. At the same time, this paper pointed out that, on the basis of full use of ocean self-repair capability, we should strengthen remediation, restoration and other artificial engineering measures to accelerate the recovery of the marine ecosystem functions. Finally, we made outlook for trends of coastal waters ecological restoration technology.

Key words: environmental ecology; coastal waters; review; ecological remediation; micro-organism; plant

0 引言

海洋是最具价值的生态系统之一, 是人类赖以生存和发展的宝贵财富。随着沿海地区城市化和工业化进程不断加快, 入海陆源污染源、海上污染源使近海区域水体水质日益恶化。水体的富营养化导致近海赤潮时有发生, 影响范围越来越大, 持续时间也逐渐加长, 造成的危害和影响日益严重。沿海地带作为人类开发利用海洋的密集区, 沿海开发活动不断加剧, 自然资源消耗急剧加快, 由此引发了海洋环境恶化、生物多样性遭到严重破坏等一系列连锁反应, 已严重威胁沿海地区经济的可持续发展。海洋生物资源衰竭已成为最重要的海洋生态环境问题之一^[1]。我国在沿海水域生态修复方面的研究起步较晚, 但发展很快, 并取得了一些重要成果。本文综述了国内外基于植物、微生物和基因工程的沿海海域生态修

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20110132110015); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金)(20130132120033); 海洋发展研究会重点项目课题(CAMAZD201403); 国家海洋局公益性行业科研专项课题(201405029)

作者简介: 高强(1966—), 男, 教授, 主要研究方向: 海洋经济管理、农业经济管理。E-mail: gao1221@126.com

复技术及其存在的问题与不足, 并对该项技术的发展进行了思考和展望。

1 植物的生态修复

植物修复 (phytoremediation) 主要利用植物的某些生理功能, 如植物的耐性, 分解或超量积累某些化学元素和物质来吸收、沉积、降解和富集水中污染物的水质污染治理技术。目前, 植物修复技术在水体富营养化治理方面取得了良好的治理效果, 处理对象包括有机质、农药、重金属等水体污染物。植物修复因其方法简单易行、成本适宜以及增强环境的景观效果等多种优势得到了较为广泛的应用。

1.1 植物浮岛技术

植物浮岛技术的原理主要依据无土栽培技术, 将现代农业和生态工程综合集成所形成的水面无土种植植物技术。栽培的植物根系在水中吸收大量的 N, P 等营养物质, 从而起到对有机污染物的吸降作用; 植物的根系、培养基和基质在吸附水中有机质的同时, 也为水中微生物和其他水生生物提供繁衍、栖息的场所, 形成独特的水域景观。该技术在美国和日本等国家进行了大量研究, 可以产出既具有经济价值又具有观赏价值的植物, 达到资源的合理利用。NAKAMURA 等^[2]研究植物对水体和生物群落的影响发现, 植物稳定生态系统是净化水体的重要因素, 在沿海水域生态系统中, 适量配置植物, 能够有效稳定水域的生态系统。刘淑媛等^[3]利用人工基质对水芹、水雍菜和多花黑麦菜 3 种经济作物进行无土栽培, 对净化富营养化的水体取得了良好的效果, 也为植物浮岛技术提供了一种可行的方案。植物浮岛技术最大的优势在于不另外占据空间, 较适合我国沿海空间利用的特点。

1.2 人工湿地技术

人工湿地技术的原理是通过湿地生态系统中的多种作用, 包括生物、物理和化学作用等的综合协作, 达到净化水质、处理废水的目的。人工湿地由人工建造, 能够由人类控制和工程化的湿地系统。水下植被有助于沿海湿地的水生态系统的重建与修复^[4]。成水平等^[5]通过香蒲、灯芯草湿地净化城镇污水, 实现了出水水质总体符合国家水质要求, 达到国家 II, III 类地面水标准, 两种情况下湿地系统对人工污水中总氮 (total nitrogen, TN) 量去除率维持在 94% 以上。丁廷华^[6]利用芦苇湿地系统进行污水处理研究, 在处理水量为 500 m³/d, 水力负荷为 5 cm/d 的条件下, 对水中污染物生物需氧量 (biology oxygen demand, BOD) 和 TN 的去除率分别达到 85.8% 和 64.6%。高云芳等^[7]通过对芦苇、互花米草、香蒲等盐沼植物的研究发现, 这些湿地系统中的典型植物能够不同程度的转移, 富集湿地水体和土壤中的 Cu, Zn, Cd, Cr, Pb, As 和 Hg 等重金属及 TN, 总磷 (total phosphorus, TP) 等营养盐物质。刘宇^[8]以湿地原生植物碱蓬为研究对象, 发现碱蓬有良好的耐盐性和对重金属的耐受性, 在实验期间对水体中的 Cu, Zn 和 Cd 的去除率均高于 75%, 具有良好的植物修复能力。李甲亮等^[9]对滨海区污水人工湿地处理对湿地生态系统的修复研究表明, 人工湿地能有效去除水体中的 BOD, N, P 等污染物, 形成淡水帷幕控制海水入侵的危害。人工湿地技术的不足之处在于, 当悬浮性污染物及有机物的浓度过高时, 容易产生堵塞和严重厌氧化而导致植物根系腐烂最终死亡。

1.3 水生植被技术

水生植被技术的原理是组建常绿型的人工水生植被, 实现植物生长期和净化功能的季节性交替互补功能, 在净化水质的同时, 还能有效阻止大量的外来污染物进入水体, 避免水质的再次污染。高吉喜等^[10]研究认为不同植物的交错种植能够提高植物对水体中 N, P 的综合净化效率。而 LAUCHLAN 等^[11]的研究发现, 植物的混合种植能够有效提高植物去除水体中 N, P 含量的能力, 然而对于植物的单一种植效

果没有做出解释。水生植被技术在削减水体营养负荷的前提下维持水体的生态稳定性,同时,也在一定程度上隔绝了土壤中的病原菌和害虫对植物的侵害,因此避免了连作的技术障碍,同时节约了劳动力。

1.4 海藻养殖技术

海藻养殖技术的原理主要是利用海藻有效吸附海洋环境中的 N 和 P,并以此作为养分供给促进生长。当生长到一定大小的时候就进行收割,通过这样的方式将海洋环境中的 N 和 P 有效去除。国外从 20 世纪 80 年代中期就开始了大型海藻的生态修复作用研究,并完成了一些实际的研究项目和处理工程,取得了不错的成绩。日本学者在礁石上修建阶梯式人工藻床,使濑户内海的生态得到了有效恢复;美国国家海洋与大气管理局启动了包括大型海藻、鱼类养殖等研究在内的国家计划,旨在恢复近海生态系统功能;韩国在 2002 年启动了以大型海藻为近海水域生物过滤器和生产力系统的计划,目的在于修复韩国近海由于鱼类养殖等带来的海域富营养化问题;我国学者近年来也提出通过大规模的海藻栽培,对富营养化的海域进行生态修复,防治海域富营养化和赤潮的发生^[12]。但是这种方式存在的前提一是养殖的海藻具有较高的经济价值,而且其经济价值越高越容易被合理地利用和收集;二是养殖的海藻能够大规模的栽培和种植,且收集方式简单便捷。陈聚法等^[13]对胶州湾海域条斑紫菜生产吸收 N, P 以及营养盐的效果进行了研究,得出条斑紫菜和龙须菜每年从海域中移除的 N, P 含量占整个胶州湾湿地海域水体中 TN 和 TP 的比例分别为 18.55%和 8.34%。黄道建等^[14]通过比较几种典型的大型海藻固氮和固磷含量,选出石莼和羽藻作为沿海海域生物修复的优选藻类。徐永健等^[15]在福建开展了养殖区富营养化的生物修复研究,在 2 个养殖海区利用龙须菜进行了修复研究。林贞贤等^[16]对大型海藻的规模化栽培进行了研究综述,并在此基础上对富营养化海域的生物修复进行了探讨。

2 微生物的生态修复

2.1 微生物的单独修复

海洋有机污染已成为沿海国家普遍关心且高度重视的环境问题之一,现代工业的高速发展提高了人类生活水平的同时,给环境带来的负效应也逐渐显现。有毒污染物在海洋环境中的积累和食物链的累计效应成为当今世界不可忽视的一大环境问题。

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 由于其潜在的毒性、致癌性及致畸诱变作用,对人类健康和海洋生态具有很大的威胁。海洋中大约有 20% 的 PAHs 来源于大气沉降,PAHs 进入海洋环境中发生一系列物理、化学和生物过程,如稀释扩散、悬浮挥发、化学氧化、生物富集和降解等。由于 PAHs 的有机污染具有持久性,在水中的溶解度一般为 10^{-3} 级,部分为 10^{-6} 级,较难溶于水,因此其沉淀物颗粒很容易在水中生物体内富集。微生物降解生态修复技术是将 PAHs 从环境中有效移除的途径,一般有两种方式:一种是微生物可以利用 PAHs 作为唯一碳源和能源进行生长代谢;另一种是在其他有机质存在的前提下通过共生代谢的方式消耗 PAHs^[17]。利用生物降解原理,微生物将海水中的 PAHs 有机污染物降解为无污染的物质,或者降解为 CO_2 和 H_2O 。PAHs 的微生物生态修复技术能避免水质的二次污染,已经成为海水中移除 PAHs 的主要途径。近年来,微生物对于水环境中 PAHs 的研究主要集中在菌种的筛选、降解途径及其影响因素等方面。夏星辉等^[18]研究表明,黄河中颗粒物对系统中各种 PAHs 的生物降解均有一定的促进作用。FIDLE 等^[19]分离出 8 株白腐真菌,都具有降解 PAHs 的能力。全向春等^[20]的研究发现,PAHs 在沉积物系统中的去除主要由微生物分解所致,基质的不同也会对不同物质表现出促进或者抑制作用。目前,学者们对低分子量的 PAHs 如萘、菲、蒽、芴等的生物降解及其降解机制的研究集中且较为深入,但是对于高分子量的 PAHs 的降解机制和微生物厌氧 PAHs 机理的认知仍需进一

步探讨。

海上石油活动以及海洋溢油事故的频发已经使海洋石油污染成为海域污染的重要来源。1969年利比亚油轮 *Joery Canyon* 的石油泄漏事故造成了海洋环境的严重污染, 对当地的海洋生态造成了严重破坏, 海水中碳氢化合物的处理问题也引起了多个国家的关注, 环境科学家也随之进行了大量的研究。微生物修复海洋生态主要有两种形式, 一是利用能够高效降解碳氢化合物的菌株, 二是改变海洋环境, 促进海洋微生物的代谢能力。修复方法主要有3种: 使用分散剂, 接种石油降解菌和使用氮磷营养盐。虽然能够分解石油污染物的微生物广泛存在于湿地环境中, 但是这些土著微生物在自然条件下的降解能力和效率很低, 需要人为地添加某些活性物质和高效降解菌株等措施促进微生物对石油的降解。1989年, 阿拉斯加 *Exxon Vadez* 油轮石油泄漏处理就是利用微生物的修复技术, 利用具有特殊降解能力的细菌菌株对海域中的污染物质进行降解, 取得了良好的治理效果, 生物修复技术也因此被推广到整个污染海滩^[21~22]。目前, 海洋石油污染的微生物修复主要通过改变环境因素, 如引入营养盐或者改善污染水域的通气情况, 以此来提高微生物的代谢能力; 提高污染物的降解效率则引入培养的降解菌株, 对修复污染的环境效果显著。与此同时, 也会引发相应的生态和社会问题, 值得学者的进一步思考。

农业的迅速发展使大量农药等陆源污染物进入海洋生态系统, 严重影响了沿海水域的环境质量和服务功能。据统计, 全世界化学农药的年产量已达200万t(原药), 品种已经超过1000种, 常用的有300多种, 我国沿海地区每年使用的农药接近20万t。这些农药虽然不是直接使用到海洋环境中, 但随着在整个系统的传输, 海洋生态也受到不同程度的农药污染, 沿海滩涂的受影响情况尤其严重。检测出的农药污染成分主要有二氯二苯三氯乙烷(*dichloro-diphenyl-tricloroethane*, DDT)、六六六和艾氏剂等, 其中约有25%的DDT被转入了海洋中。虽然有的国家开始采取措施限制DDT的使用, 但由于DDT在海洋环境中较稳定且不易分解, 而且易被海洋生物吸收, 代谢转化成毒性更强的DDD, 因此寻找降解DDD的高效菌对于沿海水域的生态修复非常必要。由于农药等污染物具有相对较稳定的结构和性质, 因此, 常规的办法很难将其彻底根除。近年来, 随着具有生物降解能力的菌株的研发, 利用微生物治理农药残留污染成为海域生态修复的热点。许育新等^[23]研发出一种微生物 *Stenotrophomonas* sp., 并将其命名为PF32, 进一步研究证实, PF32在24h内对100mg/L的高浓度甲基对硫磷的降解率超过99%。张松柏等^[24]发现能进行光合作用的细菌 *Rhodospseudomonas* sp., 能有效降解多种菊酯类农药, 不仅如此, 当添加适量的 Fe^{2+} 时, 能够有效地提高菌株对农药的降解, 该研究为菊酯类农药生物修复提供了理论依据。

2.2 微生物-植物的配合修复技术

作为生态修复的重要手段, 微生物修复既可以单独使用, 也可以作为水生植物修复的配套技术使用。水生植物能够直接给微生物的生长提供溶解性的N, P, 还能给微生物的生长提供介质, 因此两者共同的修复结果明显好于单独修复的结果。另外, 水生植物的根系还能分泌出促进嗜N, P细菌生长的物质, 提高N, P的转化和释放效率, 从而间接提高富营养化水体的净化效率。唐静杰等^[25]研究了微生物-水生植物系统中根际微生物系统和水生植物的吸收作用对净化水体的作用, 结果表明, 香根草、水葫芦和西芹3种水植物去除N, P的能力不同, 且均能较好的促进根际微生物的生长。张宪中等^[26]研究发现, 水体中自然存在的微生物、浮游生物等对N, P均有一定的降解能力, 种养水葫芦能显著增强N, P的降解效果。常会庆等^[27]采用固定化微生物和沉水植物伊乐藻两者结合研究他们对水体中N, P含量的影响变化, 结果表明, 采用两者结合能有效维持和提高水体水质, 对水体中几种形态的氮素均有不同程度的降低, 综合表现为水质明显提高。

3 生物工程的生态修复

对于污染程度较重且生物不易生存的污染海域来说,生物修复难以实施,则应考虑物理修复或者化学修复的办法,然后进一步采用生物修复。但一般来讲,简单的生物修复技术的修复效果还是不尽如人意,应采取一些强化措施形成整套的生物修复技术^[28]。这样不仅能够提高生物自身的修复能力,也能提高环境中污染物的可生物利用性。近年来,一些新技术开始被运用到生态修复中,提高了处理的效率,降低了生态修复的成本,逐渐被广泛应用于生态修复。我国已经开展了超积累机理及应用、超积累植物的筛选及超积累植物初步修复重金属污染的研究^[29]。由于超积累植物的自然属性特殊,生物量分布分散且生长缓慢,生长较为偏僻,因此,传统的生物修复技术就受到植物生长量、生长速度和适应性等因素的限制,表现出一定的局限性。WEI等^[30]建议利用分子生物技术对野生超积累植物进行改造,将实用植物的提取技术采用商业化运作的模式,将超积累基因导入数量大且生长周期短的植物体内。利用生物工程来培育高产高效的超积累植物,已经成为人工修复污染水域的一个新途径。

不仅如此,人类还开始在分子水平上利用生物分子工程技术促进细菌的遗传和进化,以此满足生态修复工程的需要。主要采取的形式有:基因DNA重组和诱变;转移植物体的质粒构建质粒菌株;使用酶定向化技术改造代谢酶。在应对赤潮灾害的过程中,国际上已先后开展了赤潮藻类的分子研究,在基因水平上确定了几种有毒赤潮的分类标准和生态学关系,利用基因工程将从赤潮藻类分离出来的物质导入有特殊抑藻生长效果的基因DNA或者质粒,可使海洋环境长期保持生态平衡,从而达到防止赤潮的目的。赤潮灾害生态修复的可能途径有两种:一是从衰亡的赤潮海水中分离出对赤潮藻类有特殊抑制生长效果的菌株,二是采用基因工程手段将抑藻因子的基因导入生物工程菌株(genetically engineered microorganisms, GEM)中,并开展大规模的生产。GEM的应用问题主要集中在菌种的存活率、繁殖情况及降解活性的保持和生态安全方面,虽然这些问题没有得到有效的解决,但是生物工程菌种以其强大的降解能力、降解谱广,仍具有广阔的应用前景。今后,生物工程技术将在海域生态修复和应用领域有更好的表现。但是GEM体内的可移动遗传因子可能会对自然生态系统造成危害,美国政府也严格限制了GEM在自然环境中的使用,许多学者呼吁对生态安全性的问题给予重视。

4 结论与展望

海洋生态修复是今后沿海水域生态修复的发展方向,近年来国内外学者在沿海水域生态修复的理论研究方面取得了大量成果,并积累了许多实践经验。然而海洋生态修复所产生的生态学的长期效应并没有引起人们的足够关注,如生物工程的转基因植物和转基因工程菌株的生态安全问题,生态强化物质的二次污染问题以及环境相容性问题。另一方面,部分生态修复技术还处于实验室或者中试阶段,没有相应的野外实验的验证。同时,海洋生态修复主要以人工修复技术为主,对海洋生态系统的自我修复能力关注不够;注重对生态系统结构的修复,却忽视了对生态系统功能的修复。鉴于上述原因,对于沿海水域的生态修复,主要从以下几点进行思考:

1) 植物在海域生态修复中发挥着重要的作用,但是对于植物的筛选工作也非常重要。海洋外来物种的入侵可能比海上石油泄漏的后果更为严重,物种入侵对海洋生态物种的多样性以及海域生态系统的威胁不容小觑,应综合考虑植物物种引入后引发的其他生态问题。另外,目前对于单一水生植物的生态修复问题研究较多,对于多种植物综合交错形成的水生植物的净化能力、植物之间协同作用是否会优化对水体的净化效果的研究有限。因此,多种植物交错搭配进行海域生态修复及植物净化水体后的资源化利用问题仍有较大的研究空间。

2) 微生物的生态修复机理还没有研究彻底, 接下来应进一步深入研究探讨微生物的生态修复机理, 同时要在实验过程中验证长期使用微生物进行生态修复的实际效果。同时, 还应在微生物生态修复过程中对水体中原有的微生物菌群结构和其他水生植物的影响进行研究探讨, 采用多学科交叉融合、多方位、多层次的科学研究手段, 坚持理论和实践结合的方式, 以提高微生物水域修复的成功率, 营造健康稳定的海洋环境。

3) 分子生物学、分子工程学和基因工程等理论和方法的交叉综合运用, 为海洋生态修复开辟了一条新途径。但是在运用基因工程的过程中, 更重要的是解决工程菌株的基因安全性和稳定性问题, 避免对海洋中的其他生物造成威胁, 引发后续的基因污染问题, 破坏海洋生态的稳定。因此, 建立相关的检测与评价体系, 深入探究基因工程菌株的降解机理, 对利用生物技术对海域生态修复的安全性和稳定性进行测评, 对于利用生物工程治理沿海水域环境污染和生物工程技术的发展完善都具有长远的意义。

另外, 在充分利用海洋的自我修复能力的基础上, 强化整治、修复和其他人工工程措施, 加速海洋功能的恢复。利用生态补偿机制, 促进沿海水域的生态修复; 利用循环经济的理念指导海洋生物修复技术, 可以选用经济价值高的养殖物种, 通过最终的人工收获将环境中的 N, P 和有机质以海产品的形式移出近海系统, 对收获的养殖海产品加以资源利用, 形成海洋环境生态修复的产业链延伸, 实现海洋环境、经济效益和生态效益的循环经济, 促进海洋的可持续开发利用。

[参考文献] (References)

- [1] MUSICK J A, HARBIN M, BERKELEY S A, et al. Marine, estuarine, and diadromous fish stocks at risk of extinction in North American (exclusive of Pacific Salmonids)[J]. Fisheries, 2000, 25(11): 6-30.
- [2] NAKAMURA K, KAYABA Y, NISHIHIRO J, et al. Effects of submerged plants on water quality and biota in large-scale experimental ponds[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2008, 4(1): 1-9.
- [3] 刘淑媛, 任久长, 由文辉. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1999, 35 (4): 518-522.
LIU S Y, REN J C, YOU W H. A study on purification of the eutrophic water body with economical plants siollessly cultivated on artificial substratum[J]. Auta Scientiarum Naturalium Universities Pekinensis, 1999, 35(4): 518-522. (in Chinese)
- [4] CHOPIN T, YARISH C, WILKES R, et al. Developing *Porphyra*/salmon integrated aquaculture for bioremediation and diversification of the aquaculture industry[J]. Journal of Applied Phycology, 1999, 11(5): 463-472.
- [5] 成水平, 况琪军, 夏宜琤. 香蒲、灯心草人工湿地地研究[J]. 湖泊科学, 1997, 9 (4): 351-358.
CHENG S P, KUANG Q J, XIA Y C. Studied on artificial wetland with cattail and rush[J]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(4): 351-358. (in Chinese)
- [6] 丁廷华. 污水芦苇湿地处理系统示范工程的研究[J]. 环境科学, 1992, 13 (2): 8-13.
DING T H. Study on an exemplary project of wetland waste water treatment[J]. Environmental Science, 1992, 13(2): 8-13. (in Chinese)
- [7] 高云芳, 李秀启, 董贯仓, 等. 黄河口几种盐沼植物对滨海湿地净化作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (34): 19499-19501.
GAO Y F, LI X Q, DONG G C, et al. Purification of several salt marsh plants to the coastal wetlands in the estuary of Yellow river[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(34): 19499-19501. (in Chinese)
- [8] 刘宇. 滨海盐生植物净化海水重金属能力研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
LIU Y. The research of decontamination foe heavy metals of seawater by halophyte from coastal area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese)

- [9] 李甲亮, 王琳, 任家国, 等. 污水人工湿地处理对滨海生态系统修复研究进展[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(3): 191-195.
LI J L, WANG L, REN J G, et al. Progress on the coastal ecosystem renovation by sewage treatment in constructed wetland[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(3): 191-195. (in Chinese)
- [10] 高吉喜, 叶春, 杜娟, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 247-251.
GAO J X, YE C, DU J, et al. Study of removing ability of macrophytes to N, P in run-off[J]. China Environment Science, 1997, 17(3): 247-251. (in Chinese)
- [11] LAUHLAN H F, SPRING M C, DAVID S. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface waters microcosms[J]. Bio-resource Technology, 2004, 94(2): 185-192.
- [12] 柴召阳, 何培民. 我国海洋富营养化趋势与生态修复策略[J]. 科学, 2013, 85(4): 48-52.
CHAI Z Y, HE P M. Trends of marine eutrophication in China and ecological restoration strategy[J]. Science, 2013, 85(4): 48-52.
- [13] 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.
CHEN J F, ZHAO J, GUO F, et al. Study on bioremediation of *Porphyra yezoensis* on eutrophic condition in the seawaters of Jiaozhou bay wetland[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(1): 93-101. (in Chinese)
- [14] 黄道建, 黄小平, 岳维忠. 大型海藻体内 TN 和 TP 含量及其对近海环境修复的意义[J]. 台湾海峡, 2005, 24(3): 316-321.
HUANG D J, HUANG X P, YUE W Z. Contents of TN, TP in macroalgae and its significance for remediation of coastal environment[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(3): 316-321. (in Chinese)
- [15] 徐永健, 钱鲁闽, 焦念志. 江蓠作为富营养化指示生物及其修复生物的氮营养特性[J]. 中国水产科学, 2004, 11(3): 276-280.
XU Y J, QIAN L M, JIAO N Z. Nitrogen nutritional character of *Gracilaria* as bioindicators and restoral plants of eutrophication[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(3): 276-280. (in Chinese)
- [16] 林贞贤, 汝少国, 杨宇峰. 大型海藻对富营养化海湾生物修复的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2006(4): 128-134.
LIN Z X, RU S G, YANG Y F. Prospect for bioremediation of large-sized seaweed cultivation in eutrophic bays[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006(4): 128-134. (in Chinese)
- [17] LEIA L, KHODADOUSTB A P, SUIDANA M T, et al. Biodegradation of sediments-bound PAHs in field contaminated sediment[J]. Water Research, 2005(9): 349-361.
- [18] 夏星辉, 余晖, 陈立. 黄河水体颗粒物对几种多环芳烃生物降解过程的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1226-1231.
XIA X H, YU H, CHEN L. Effect of particles on the biodegradation of PAHs in natural waters: a study for the Yellow river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9): 1226-1231. (in Chinese)
- [19] FIDLE J A, JONG E D, COSTA G F. Bio-degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by new isolates of white rot fungi[J]. Applied Environment Microbiology, 1992(8): 2219-2226.
- [20] 全向春, 汤茜, 余博凡, 等. 大辽河水系沉积物对 PAHs 生物降解的特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(8): 758-763.
QUAN X C, TANG Q, YU B F, et al. Biodegradation of PAHs in sediments samples from three typical river sections of Daliao river watershed and characterization of microbial community[J]. China Environmental Science, 2008, 28(8): 758-763. (in Chinese)
- [21] BRAGG J R, PRINCE R C. Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill[J]. Nature, 1994, 368: 413-418.
- [22] PRITCHARD H P, COSTA C F. Alaska oil spill bioremediation report[J]. Environment Science Technology, 1991, 25(3): 372-379.
- [23] 许育新, 冯昭中, 陆鹏, 等. 甲基对硫磷降解菌 PF32 的分离鉴定及其降解特性研究[J]. 农药学学报, 2009, 11(3): 329-334.

- XU Y X, FENG Z Z, LU P, et al. Isolation and characterization of capable of degrading parathion-methyl bacterium *Stenotrophomonas* sp. PF32[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2009, 11(3): 329-334. (in Chinese)
- [24] 张松柏, 张德咏, 刘勇, 等. 一株菊酯类农药降解菌的分离鉴定及其降解酶基因的克隆[J]. 微生物学报, 2009, 49(11): 1520-1526.
- ZHANG S B, ZHANG D Y, LIU Y, et al. Isolation, identification and degrading gene cloning of a pyrethroids-degrading bacterium[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2009, 49(11): 1520-1526. (in Chinese)
- [25] 唐静杰, 成小英, 张光生. 不同水生植物-微生物系统去除水体氮磷能力研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 270-273.
- TANG J J, CHENG X Y, ZHANG G S. Study on elimination capacity of nitrogen and phosphorus by different aquatic plants-microorganism systems[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(22): 270-273. (in Chinese)
- [26] 张宪中, 孙梅, 张维娜, 等. 2种水葫芦-微生物系统水质净化效果的比较[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4645-4648.
- ZHANG X Z, SUN M, ZHANG W N, et al. Comparison of the water purification effect of two kinds of water hyacinth-on microbial system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(8): 4645-4648. (in Chinese)
- [27] 常会庆, 杨肖娥, 方云英, 等. 伊乐藻和固定化细菌共同作用对富营养化水体中养分的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 114-117.
- CHANG H Q, YANG X E, FANG Y Y, et al. Effect on nutrient of eutrophicated water by *Elodea muttallii* and immobilized bacteria[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(3): 114-117. (in Chinese)
- [28] OTTOSEN L M, PEDERSEN A J, RIBEIRO A B, et al. Case study on the strategy and application of enhancement solutions to improve remediation of soils contaminated with Cu, Pb and Zn by means of electro dialysis[J]. Engineering Geology, 2005, 77(3): 317-329.
- [29] 徐君, 项劲松. 环境污染的植物修复技术及其应用前景[J]. 农业环境与发展, 2004, 21(6): 35-38.
- XU J, XIANG J S. Environmental phytoremediation technology and its application prospect[J]. Agro-environment and Development, 2004, 21(6): 35-38. (in Chinese)
- [30] WEI S H, ZHOU Q X, WANG X, et al. A newly-discovered cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 33-38.