

富营养化滩涂生物修复研究进展

沈 辉^{1,2}, 万夕和¹, 何培民²

(1. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007; 2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 近年来, 随着海水富营养化加剧, 滩涂沉积物多项重要理化参数也随之恶化, 进而导致滩涂底质生境退化, 表现出较为明显的富营养化趋势。为改善和恢复滩涂沉积物的生态环境, 国内外学者进行了较多的生物修复探索研究工作。作者概述了滩涂富营养化的现状及原因, 各种滩涂生物修复技术的原理、特点及其修复效果, 分析了各类生境修复技术的优缺点。同时, 就滩涂生境修复技术在滩涂修复和海洋环境保护领域今后的研究重点进行了展望。

关键词: 滩涂; 富营养化; 生物修复

中图分类号: X55 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)10-0160-10

doi: 10.11759/hyxx 20150807001

海洋沉积物作为海洋环境中氮、磷的重要源和汇, 对维持海洋生态平衡、修复失衡的海洋生态环境具有重要意义^[1]。随着陆源氮、磷与海水养殖废水的排放, 水体中氮、磷浓度急剧的上升, 其营养盐逐步富集至沉积物, 造成了水体及沉积物都出现了富营养化现象^[2]。除陆源氮、磷的输入外, 过高密度的悬浮性贝类增殖也是引起滩涂底质环境开始出现富营养化的原因之一^[3]。由贝类介导的生物沉降虽然有利于有机物在底质中沉积^[4], 但高密度悬浮性贝类增殖滩涂区域水体交换受到限制, 贝类所排出的粪便增加了底质中溶氧的大量消耗, 在微生物的作用下, 会加速硫的还原、增强反硝化、刺激硝酸盐还原为氨, 这一系列的过程对生态环境造成显著影响, 进而导致其他底栖生物数量和种类减少, 同时使整个养殖生态系统的结构和功能发生改变^[5-6]。

目前, 滩涂沉积物富营养化已逐渐引起国际社会的广泛重视, 国内外学者对沉积物富营养化生境修复进行了一系列的探索研究, 作者就相关研究进行了综述并概述了滩涂富营养化的现状及原因, 总结了海岸带滩涂修复的研究进展及发展趋势。

1 滩涂的富营养化现状及原因

2013 年《中国海洋环境质量公报》^[7]显示, 海水中无机氮和活性磷酸盐含量超标导致了近岸局部海域的富营养化。2013 年夏季, 呈富营养化状态的海域面积约 $6.5 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中重度、中度和轻度富营养化海域面积分别为 18 000、16 810 和 29 980 km^2 , 重度富营养化海域主要集中在辽东湾、长江口、杭

州湾、珠江口的近岸区域。“十一五”以来, 沿海主要入海氮磷污染物排放量总体均呈上升趋势, 尤其是随着沿海开发战略的逐步落实, 呈现较为明显的上升态势。以江苏为例, “十五”末, 入海河流总氮(TN)排放量约为 $2.01 \times 10^5 \text{ t}$, 至“十一五”末已增至 $7.69 \times 10^5 \text{ t}$, 同比增长约 284%^[8]。

由于近岸水体中较高含量营养盐的刺激, 浮游植物生产力和生产量增加, 水体中溶氧大量被消耗, 厌氧细菌迅速繁殖, 引起底层海水出现无氧和缺氧状态, 逐步演变成永久无氧区, 生物多样性出现大幅度下降, 导致滩涂底质生境退化^[9-12]。据 2013 年《中国海洋环境质量公报》^[7]显示, 近岸典型海洋生态系统如河口、海湾、滩涂湿地、珊瑚礁、红树林和海草床等分别处于健康、亚健康和不健康状态的海洋生态系统约占 23%、67%和 10%; 另外, 公报中还指出, 苏北浅滩滩涂湿地生态系统呈亚健康状态, 其原因主要是由于苏北浅滩湿地滩涂围垦, 现有滩涂植被面积较上年减少近一半, 浮游植物密度和浮游动物生物量高于正常范围, 进而导致了滩涂生态系统退化的现象。

导致滩涂底质生境退化的因素较为复杂, 但从本质上分析, 主要由于滩涂底质系统物质和能量输入与输出不平衡所造成, 与其自净能力弱、环境容量

收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2015-11-13

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAC07B03)

[Foundation: National Key Technology Support Program, No. 2012BAC07B03]

作者简介: 沈辉(1981-), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事海洋微生物学研究, E-mail: darkhui@163.com

小、易形成物质(氮、磷及衍生的有毒有害物质)积累关系最为密切。

2 富营养化生物修复研究进展

2.1 生物修复

生物修复是指利用生物特别是微生物,将存在于土壤、地下水和海洋等环境中的有毒、有害的污染物降解为二氧化碳和水,或转化为无害物质,从而使污染生物环境修复为正常生态环境的工程技术体系。生物修复的类型主要分为原位、异位及原位-异位联合 3 种生物修复。在已报道的研究中主要以原位修复为主,包括生物翻耕法、植物修复法、微生物修复、生物扰动法等。如红树林湿地营造技术、滨海湿地污染物消减技术、大型海藻水质净化技术、海水生态浮床技术、利用贝类或多毛类修复滩涂和浅海环境的技术等一系列行之有效的海洋生物修复技术。

2.2 生物修复的研究进展

2.2.1 植物修复

直接或间接地利用植物去除污染物的技术被称为植物修复,主要通过 3 种机制去除环境中的有机污染物,即直接吸收、刺激植物根区微生物活性及增强根区的矿化作用。

2.2.1.1 大型海藻修复

大型海藻因特殊的生理功能在研究高效去除氮、磷等污染物的富营养化防治技术中受到极大地推广^[13-14]。大量海藻作为水体营养盐的过滤器,优先利用水体中的 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 等无机盐离子,并吸收 CO_2 , 产生 O_2 , 对平衡水体生态环境具有积极的影响。大型藻的营养贮存机制与浮游植物相比,更适合在营养盐波动的水体环境中生长^[15]。人工栽培海藻易形成规模,快速生长的同时能从周围环境水体中大量吸收氮、磷及铅、镉、锌等重金属,释放出氧气,调节水体 pH 值,并在水生生态系统的碳循环中发挥重要作用^[16-17]。据研究报道,江蓠(*Gracilaria*)、紫菜(*Porphyra*)、海带(*Laminaria japonica*)及浒苔(*Enteromorpha*)等大型海藻都具有较强的营养盐吸收能力,每千克江蓠、紫菜、海带及浒苔可利用氮盐的能力分别为 50~60 g、50~60 g、30~40 g 及 45 g^[18-21]。

采用大型藻类处理封闭海水养殖系统的废水始于 20 世纪 70 年代中期,由于该方法可以有效减少环境对溶解态营养物质的负荷量,因此 20 世纪 90 年代

欧盟率先启动了有关富营养化和大型海藻的 EUMAC 研究计划,对波罗的海到地中海欧洲沿岸海的海藻在海区富营养化过程中的响应和作用进行了研究与分析,这些研究成果逐渐发展和完善了鱼、虾、贝类和大型海藻等多种生物混养的综合养殖模式。在过去几十年里,中国一直具有大面积的经济海藻栽培,在兼顾经济效益的同时又达到了平衡生态系统的作用^[22]。近年来,进行了利用栽培海藻防治富营养化及赤潮暴发机制的研究。He 等^[19]对紫菜养殖期间水体中的氨氮、亚硝态氮及硝态氮的平均浓度进行了监测,结果表明,紫菜的生长吸收作用可以使栽培区的水质中的无机氮大幅度地降低,从而使水质由从劣类改善至 - 类。Huo 等^[23]开展了红藻对网箱养殖海区的生态修复及生态养殖匹配模式的研究,基于这个模式条件下,养殖海区的营养盐指标具有大幅度地下降。龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)也具有同样的水体净化作用,其大规模的栽培会对浅海贝类养殖区的底质环境有所改善,并有一定的生态调控作用^[24]。大型海藻除了直接吸收营养作用外,其大规模生长会阻碍光线的传输并间接减弱浅海区底层小型藻类的光合反应,增加藻类沉积并因此而造成沉积物中溶解氧消耗量的增加,有利于反硝化作用的进行,从而降低了沉积物中的无机氮含量^[25]。

2.2.1.2 陆生植物修复

因滩涂环境具有高盐和浸没的特性,在此环境特征中可生存的植物种类较少,因此较少陆生植物可供修复应用。目前在滩涂岸基处能较好生存的植物有大米草(*Spartina anglica*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)、海滨锦葵(*Kosteletzkyia virginias*)及海蓬子(*Salicornia bigelovii*)等。

大米草是盐沼湿地先锋物种之一,中国于 1963 年引入,由于其适应高盐的生理学特点,已成为中国海岸带湿地植被的优势群落之一^[26-28]。大米草区除了具有改善土壤结构,增加土壤透气性,减弱土壤厌氧呼吸的作用外,还可以大幅度地提高沙蚕(*Nereis succinea*)的生物量^[29-30]。大米草具有发达的根系,可以适应较为复杂的生态环境,如土壤的盐度变化、潮汐周期、及土壤中溶氧的剧烈变化等^[31]。大米草区除了具有较强的降解水体中有机物的能力外,还可以很大程度上分解和吸收大型植物的有机碎屑,从而平衡水体和沉积物的生态环境^[32]。另外, Sousa 等^[33]从应用大米草对河口生态修复的研究中

发现,大米草主要对氮的吸收能力较强,可以有效地平衡滩涂底质中氮盐,达到降低水体富营养化的目的。大米草和互花米草因具有很强的生长优势且难以被清除的特点,被归类为入侵物种,因此应用到生态修复的研究领域备受广大学者争议。作者认为在滩涂环境较少植物生存的特殊环境条件下,合理地应用大米草和互花米草对生态环境的修复具有利大弊小的作用。例如,美国学者采用“梯田湿地”技术种植互花米草及其他湿地植被,对海岸浅海区域建造缓坡状湿地加以保护,从而达到修复海岸带生态环境之目的^[34]。

海蓬子具有耐盐碱胁迫的生理学特点,海滨锦葵自然分布于美国含盐沼泽,1992 被引入中国,在江苏海堤滩涂区多年栽种试验表明,该植物能较好地适应江苏滩涂沉积物环境,具有优良的耐盐碱能力,已被广泛地做为蔬菜、药材等开发利用^[35-36]。海蓬子可以适应较大盐度范围的土壤环境,细胞内的各种反应产生超氧自由基、过氧化氢和单线态氧等,保护细胞膜、抵抗盐胁迫造成的氧化逆境^[37-38]。即使在不同盐度条件下,海蓬子也可以适应出新的耐盐机制^[39]。海蓬子也作为生物过滤器应用到海水养殖废水的营养盐去除研究中,且这种养殖与种植相结合的生态模式也日益得到人们的关注^[40-41]。海滨锦葵是一种全海水浇灌植物,能有效地利用养殖废水及海水中的营养盐,起到净化海水、改善和恢复滩涂沉积物的生态环境^[39, 42]。上述海蓬子及海滨锦葵虽具有较好的耐盐及吸收营养盐的能力,但对潮汐淹没生态适应性较弱,将其应用于滩涂修复仍具有一定的局限性。

2.2.2 生物扰动修复

2.2.2.1 生物扰动

生物扰动一般是指底栖动物由于摄食、建管、筑穴、避敌、爬行、排泄和迁移等行为造成沉积环境发生变化,进而影响营养盐在沉积物—水界面之间的迁移和转化,同时也影响有机物的分解和矿化颗粒态和溶解态物质迁移变化的过程,是滩涂环境一个重要的生态过程^[43]。

2.2.2.2 生物扰动研究进展

大量研究表明,近岸滩涂沉积物对介导地球生物循环和能量流动起着至关重要的作用^[44]。而生存于沉积物环境中的底层大型动物对于沉积物的结构、底层-水界面的能量、微生物群落结构具有十分重要的影响,由此可见生物扰动作用对近岸滩涂底

质环境甚至整个地球生态系统的贡献作用^[45]。

滩涂环境中典型的生物扰动中介主要有双壳类、环节动物蠕虫类(多毛类、寡毛类)、腹足类、小型甲壳类等底栖动物。大型底栖动物是底栖生态系统的一部分,其通过扰动和灌溉作用除了改变了沉积物的物理化学性质,同时还促进了硝化和反硝化作用^[46]。

研究表明,底栖动物对沉积物的影响主要分为 3 个方面:(1)底栖动物的扰动可以改变沉积物的结构,使沉积物密度降低,增加沉积物间隙水的营养盐通量^[47-48],而且在生物扰动的过程中,将大量高溶氧的上层水泵入底层,增加了底质环境的含氧量,提高了氧化还原电位,促进了氮、磷、硫的物质循环^[49-51]。Shull 等^[51]研究认为,双壳类软体动物能够提高沉积物的有氧呼吸,多毛类环节动物则恰好相反,它可以大大促进氧气的吸收,但不能显著提高沉积物中的有氧呼吸作用。另外,掘穴动物的活动还能够增加沉积物与上覆水体接触的区域,携带营养物质、氧气及某些微生物进入沉积物深层,并可以在沉积物深层到表层间互相转移物质^[52];(2)生物扰动可以显著地改变沉积物中的微生物群落结构,尤其促进了氮循环功能细菌的群落结构和丰度,从而显著提高沉积物中的硝化速率和反硝化速率^[50, 53-54]。多毛类环节动物扰动提高了上覆水体和沉积物的反硝化作用,其中约 79%的反硝化作用由多毛类环节动物扰动造成,这一作用比双壳类软体动物活动的微环境中要高出 2 倍,推论认为多毛类环节动物通过反硝化作用转移硝态氮,而双壳类软体动物则主要促进了硝化作用过程^[49]。端足类甲壳动物对洞穴壁的硝化作用比表面沉积物高 3 倍,这是由于含有大量硝化细菌的内壁的微生物群落组成和化学特征所致,因此底栖动物对有机物质沉降和沉积物中氮的转移过程均具有重要影响^[55];(3)在底栖动物肠道、鳃、体表(壳)等部位,共存着复杂的微生物群落,且微生物群落在生物扰动的作用下,获得生命活动所需要的碳源、氮源、好氧微环境及厌氧微环境,由此产生营养盐的利用和消耗^[56-57]。

目前,双壳贝类、多毛类及甲壳类等底栖动物被应用到生态环境的修复,在已报道的研究中利用沙蚕对沉积物的修复及其效果评价的方法较多^[58-60]。牛俊翔等^[61]通过投入一定密度的沙蚕对滩涂贝类养殖区底质中的硫化物进行修复,实验结果表明,沙蚕的扰动作用除显著提高沉积物中的氧化还原电位

外,还增加了硫化物在底质与水体间的通量,从而使滩涂底质中的硫化物显著降低。陈慧彬等^[62]采用原位和异位修复生物的投放(毛蚶(*Scapharca subcrenata*)、青蛤(*Cyclina sinensis*)、沙蚕等底栖动物)对渤海典型海岸带滩涂沉积物进行民生物修复,发现沙蚕摄食活动可促进底质形成微食物链,提高底质生物多样性和系统稳定性,且通过对底质粒度的分析,表明沙蚕的活动能有效地消耗底质中腐殖质,减少底质中的有机物微粒。

2.2.3 微生物修复

2.2.3.1 微生物修复

微生物修复主要通过微生物的作用清除土壤中的污染物,包括自然和人为控制条件下的污染物降解或无害化处理。主要采用生物刺激和生物强化两种手段来加速或加强微生物的修复过程。在生物地球化学物质循环当中,微生物是碳、氮、硫、磷等元素循环的关键促进者,其中氮素循环功能细菌涉及生物固氮、氨化、脱氨、硝化、反硝化等8个环节,其作用机制受到多种因素的影响^[63]。

2.2.3.2 生物强化的研究进展

生物强化是向污染环境中间断地投入外源微生物、酶或培养基等,使外源作用微生物在污染环境生存并降解污染物的过程。微生态制剂主要由光合细菌、乳酸菌、酵母菌等多种微生物组成,在对富营养化水体的修复应用中可以有效地降低水体中的氮、磷含量。目前,针对沉积物环境修复主要集中在对氮循环功能细菌的研究,利用硝化-反硝化过程去除沉积物环境中富集的氮盐,对氮素循环发挥着极其重要的作用^[64-65],尤其反硝化作用在减轻海岸带地区的氮负荷方面有着十分重要的作用^[65]。利用微生物的反硝化作用去除地下水中过量的硝酸盐已有广泛的研究报道^[66-67],但针对沉积物或土壤中的硝酸盐的去除研究较少,已有的研究报道仅限于菌株的分离或小规模地测试。刘咏等^[68]从巢湖湿地土壤中分离筛选得到高效的异养反硝化细菌,结合芦苇秸秆一同施用于硝酸盐污染的土壤,其硝酸盐降解能力达到90%。全为民等^[69]从长江沉积物中筛选分离出一株海洋反硝化细菌,模拟了该细菌对硝酸盐氮的去除效率,室内实验证实细菌具有较强的反硝化作用,能在一周内将90%的硝酸盐氮去除。

2.2.3.3 生物刺激的研究进展

生物刺激是指利用土著微生物,提供其生长所需要的条件,诸如电子受体、载体以及营养物等,使

土著微生物降解污染物的过程。

近年来,生物炭在土壤改良的研究中成为研究热点。生物炭主要是由植物在完全或部分缺氧的条件下经低温热解炭化产生的一类难溶性固态物质。生物炭可以改变土壤的理化形态(土壤的酸碱度、有机碳含量、阳离子交换量等)^[70-71],也可以改变沉积物中的营养物质循环,如温室气体 N_2O 、 CO_2 及 CH_4 等^[72-73]。研究还发现,生物炭的施用可以影响细菌的丰度及其群落结构^[74-76]。Berglund等^[77]研究认为,生物炭可以吸附土壤环境中的一些不利于微生物硝化作用的物质如多酚或单菇类物质,因此生物炭的添加可以促进土壤中细菌的硝化作用。Song等^[78]对滩涂沉积物添加生物炭后的氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)进行了研究,发现生物炭可以刺激沉积物细菌的氨氧化速率,并发现在此过程中AOB在细菌群落中占优势,但与硝化速率成正相关的却为AOA。目前,诸多研究均表明,生物炭输入可以显著影响土壤中氨氧化菌的丰度和活性,但对氨氧化作用的影响仍存在广泛争议。这主要是由于AOA和AOB对环境应力和环境变化非常敏感,各类环境因子的变化都会影响其丰度和活性^[79]。另外,研究者们开始尝试施用贝壳砂或生物炭对生境退化的沉积物进行改善,研究发现施用贝壳砂后,其理化性质和氮循环过程发生了极显著的变化,微生物群落也发生了显著的变化,其反硝化细菌的多样性有了进一步的提高^[80]。

2.2.4 生物翻耕修复

2.2.4.1 生物翻耕

生物翻耕法是通过污染土壤进行翻耕,提高土壤的通透性,创造污染物被氧化的条件,从而达到降低污染物含量的目的。

2.2.4.2 生物翻耕的研究进展

土壤是微生物群落的载体,具有功能齐全的微生物群落,对污染的沉积物进行翻耕,使水层与沉积物营养物质交换增加,提高沉积物的通气性,调整污染沉积物的酸碱度,并改善微生物的微环境^[81]。陈聚法等^[82]采用翻耕和翻耕并筑池的生物修复方式对乳山湾西流区的富营养化滩涂进行了修复,结果表明生物翻耕修复区沉积物环境中的各项理化指标都有所改善,且修复区中的缢蛏(*Sinonovacula constricta*)生物量明显高于对照区。同样,马绍赛等^[83]采用了压沙和翻耕的物理方式对乳山湾菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)养殖老化滩涂进行了修复,

比较了不同的压沙厚度和翻耕深度的修复效果,得出翻耕 40 cm 并结合压沙 3 cm 的效果最好。生物翻耕技术可操作性强、见效性的特点,但底栖生物及微生物群落在环境剧烈变化的条件下被大幅度地改变,该方法的使用还存在一定的争议。

3 研究展望

生境修复技术的推广应用推动海水养殖业健康发展,使近岸水域资源得到了有效利用,但有关滩涂富营养化的生境修复研究国内外才刚刚起步,其滩涂生态环境营养盐污染动力学模型及各类生境修复技术的研究还处理探索阶段,还需要对以下问题进行关注和深入的研究。

3.1 滩涂养殖模式的研究

由于氮磷的陆源输入及近岸养殖滩涂的生物沉积作用,使滩涂底质环境恶化,导致底栖生物群落和浮游生物群落生物多样性明显降低^[84],影响了滩涂养殖的健康发展,破坏了海洋生态环境的平衡,对富营养化的滩涂环境实施生境修复迫在眉睫。部分滩涂地区的悬浮性贝类养殖品种单一,养殖密度过大,生物沉积强度较高,结构不合理,个体间的空间生态位竞争激烈,进而导致病害相互传染,养殖对象容易产生暴发性死亡,死亡贝类组织的腐败进一步对滩涂底质环境造成了极大的破坏^[85-86]。底栖贝类可以提高底质-水界面的物质通量、促进营养盐的循环和能量流动(之上已讨论),由此,对贝类的养殖模式结构进行合理的调整可以有效地改善近岸滩涂的富营养化现状。

3.2 滩涂养殖环境容量的研究

针对贝类养殖模式的合理利用问题,贝类养殖容量这一概念首次被日本学者提出。它主要是应用海水中初级生产力对贝类养殖的容量进行研究,目前建立了海湾扇贝的养殖容量模型、贻贝养殖容量模型,对贝类的养殖生产起到了重要的指导作用^[87-88]。但以上模型主要针对挂养式贝类,模型中重要的因素主要为水体初级生产力、贝类的摄食、同化、吸收的参数,而对于滩涂底栖贝类与底质环境的相互作用还未进行建模分析,因此并不适用于滩涂底栖贝类的养殖容量研究。尽管滩涂底质的环境参数较为复杂且变化敏感,但滩涂贝类养殖容量模型的建立与分析将成为生态环境可持续发展利用的重要研究手段。

3.3 生物修复技术的合理搭配

在上述生物修复技术中,沉积物中的营养盐在物理翻耕后随着潮汐的作用返回至水体中,该技术对于底质修复的效果最为直接、快速,但营养盐仅仅从底质中转移至水体中,无法直接有效地将营养盐从海洋环境中移除,因此这种修复技术具有片面性。大型海藻虽不能直接从沉积物中吸收营养盐,但可以高效地吸收物理翻耕后转移至水体中的营养盐,同时大型藻类能固碳、产生氧气,调节水体中的 pH 值,从而对物理翻耕进行有效地互补。另外,物理翻耕技术对底质中的微生物群落结构及其活性功能造成了较大的影响,通过补充高效的选择性反硝化细菌对底质中的微生物进行定向引导和强化,从而恢复和强化底质中的微生物群落结构和功能。同时,多毛类的生物扰动作用会增强底质中的硝化和反硝化作用。因此,各类生境修复技术的合理搭配会更好达到其修复效果,实现对滩涂生态环境的修复和调控。

3.4 微生物修复的深入研究

微生物在全球生物地球化学循环中发挥着重要功能,其中氮循环功能细菌介导的氮循环可影响全球的变化,并对环境的变化做出响应^[28, 89]。上述各类生境修复技术不同程度地影响了底质中氮循环功能细菌的群落结构与丰度,调整了微生物群落的结构,从而达到生境恢复的目的。贝类砂、生物炭、大米草、大型底栖动物的扰动作用在不同程度上对微生物群落结构进行影响,增强底质中的硝化和反硝化速率,从而达到生物修复的作用。由此,在结合环境理化指标的基础上,通过对修复过程中的各类氮循环功能基因的分子标记研究微生物的多样性,从微生态的角度来分析和评估生境修复效果。在过去的 10 年间,非培养的微生物分子生物学技术得到了长足的进步,它允许我们在群落的水平上分析细菌。目前,以 PCR 为基础的分子生物学技术如 16s rDNA、PCR-DGGE、RFLP、高通量测序等分析功能微生物群落已经成功应用于海洋沉积物^[90-96]。以上研究方法可以为研究和评价海洋沉积物环境变化机制提供了新方法。

参考文献:

- [1] Reise K. Sediment mediated species interactions in coastal waters[J]. Journal of Sea Research, 2002, 48(2): 127-141.

- [2] Conley D J, Stockenberg A, Carman R, et al. Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 45(5): 591-598.
- [3] 崔毅, 马绍赛, 陈碧鹃, 等. 乳山湾生物理化环境现状研究[J]. 中国水产科学, 1999, 4: 76-80.
Cui Yi, Ma Shaosai, Chen Bijuan, et al. Study on the status of bio-physic-chemical environment in Rushan Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 4: 76-80.
- [4] Haven D S, Morales A R. Biodeposition as a factor in sedimentation of fine suspended solids in estuaries[J]. Geological Society of America Memoirs, 1972, 133: 121-130.
- [5] Gilbert F, Souchu P, Bianchi M, et al. Influence of shellfish farming activities on nitrification, nitrate reduction to ammonium and denitrification at the water-sediment interface of the Thau lagoon, France[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 151: 143-153.
- [6] Ragnarsson S A, David R. Effects of the mussel *Mytilus edulis* L. on the invertebrate fauna of sediments[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1999, 241(1): 31-43.
- [7] 2013 年中国海洋环境状况公报. http://www.mem.gov.cn/res_base/mem_gov_www/upload/article/image/2014_2/4_3/.
Chinese State of the Marine Environment Bulletin in 2013. http://www.mem.gov.cn/res_base/mem_gov_www/upload/article/image/2014_2/4_3/.
- [8] 姜晟, 李俊龙, 李旭文, 等. 江苏近岸海域富营养化现状评价与成因分析[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 4: 26-29.
Jiang Sheng, Li Junlong, Li Xuwen, et al. The eutrophication evaluation and cause analysis in Jiangsu coastal sea area[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2012, 4: 26-29.
- [9] Heisler J, Glibert P M, Burkholder J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 3-13.
- [10] Meyer R, Köster M. Eutrophication of marine waters: effects on benthic microbial communities[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 41(1): 255-263.
- [11] 王迪迪, 孙耀, 石晓勇, 等. 乳山湾东流区沉积物中氮形态的分布特征[J]. 海洋环境科学, 2009, 6: 639-642.
Wang Didi, Sun Yao, Shi Xiaoyong, et al. Distribution of nitrogen in sediments of Eastern Rushan Bay[J]. Marine Environmental Science, 2009, 6: 639-642.
- [12] 王迪迪, 孙耀, 石晓勇, 等. 乳山湾东流区沉积物中不同形态磷的分布特征[J]. 生态学报, 2008, 5(5): 2417-2423.
Wang Didi, Sun Yao, Shi Xiaoyong, et al. Distribution of different phosphorus forms in sediments of Eastern Rushan Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 5(5): 2417-2423.
- [13] Anderson R J, Smit A J, Levitt G J. Upwelling and fish-factory waste as nitrogen sources for suspended cultivation of *Gracilaria gracilis* in Saldanha Bay, South Africa[J]. Hydrobiologia, 1999, 398: 455-462.
- [14] Fei Xiugeng. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation[J]. Hydrobiologia, 2004, 512(1-3): 145-151.
- [15] Harrison P, Hurd C. Nutrient physiology of seaweeds: application of concepts to aquaculture[J]. Cahiers De Biologie Marine, 2001, 42(1/2): 71-82.
- [16] Mercado J M, Niell F X. Carbon dioxide uptake by *Bostrychia scorpioides* (Rhodophyceae) under emersed conditions[J]. European Journal of Phycology, 2000, 35(01): 45-51.
- [17] Nelson S G, Glenn E P, Conn J, et al. Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system[J]. Aquaculture, 2001, 193(3): 239-248.
- [18] Haglund K, Pedersén M. Outdoor pond cultivation of the subtropical marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* in brackish water in Sweden. Growth, nutrient uptake, co-cultivation with rainbow trout and epiphyte control[J]. Journal of Applied Phycology, 1993, 5(3): 271-284.
- [19] He Peimin, Xu Shannan, Zhang Hanye, et al. Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyra yezoensis*, cultivated in the open sea[J]. Water Research, 2008, 42(4): 1281-1289.
- [20] 田千桃, 霍元子, 张寒野, 等. 浒苔和条浒苔生长及其氮氮吸收动力学特征研究[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 252-258.
Tian Qiantao, Huo Yuanzi, Zhang Hanye, et al. Preliminary study on growth and NH_4^+ -N uptake kinetics of *Enteromorpha prolifera* and *Enteromorpha clathrata*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(2): 252-258.
- [21] 温珊珊, 张寒野, 何文辉, 等. 真江蓠对氨氮去除效率与吸收动力学研究[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 794-803.
Wen Shanshan, Zhang Hanye, He Wenhui, et al. Study on NH_4^+ -N removing efficiency and kinetics in *Gracilaria asiatica*[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(5): 794-803.
- [22] Tseng C K, Fei X G. Macroalgal commercialization in the Orient[J]. Hydrobiologia, 1987, 151(2): 167-172.

- [23] Huo Yuanzi, Wu Hailong, Chai Zhaoyang, et al. Bio-remediation efficiency of *Gracilaria verrucosa* for an integrated multi-trophic aquaculture system with *Pseudosciaena crocea* in Xiangshan harbor, China[J]. Aquaculture, 2012, 326: 99-105.
- [24] 杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 等. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 77-80.
Yang Yufeng, Song Jinming, Lin Xiaotao, et al. Seaweed cultivation and its ecological roles in coastal waters[J]. Marine Environmental Science, 2005, 24(3): 77-80.
- [25] Tuominen L, Mäkelä K, Lehtonen K K, et al. Nutrient fluxes, porewater profiles and denitrification in sediment influenced by algal sedimentation and bioturbation by *Monoporeia affinis*[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(1): 83-97.
- [26] Li Xiangping, Tang Gengguo, Wang Dingsheng, et al. Studies on the community characteristics, the distribution and succession patterns of wetland vegetation in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1997, 22(1): 47-52.
- [27] Shen Y M, Zeng H, Wang H, et al. Characteristics of halophyte and associated soil a long aggradational muddy coasts in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 1-6.
- [28] Liu L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission[J]. Ecology Letters, 2009, 12(10): 1103-1117.
- [29] 赵清良, 赵强. 大米草对双齿围沙蚕生境中土壤改良作用的研究[J]. 生态学杂志, 1997, 16(2): 28-30.
Zhao Qingliang, Zhao Qiang. Effects of *Spartina anglica* to the soil habitats of *Perenereis aibuhitensis*[J]. Department of Biology, 1997, 16(2): 28-30.
- [30] 赵清良, 赵强, 徐家铸. 启东双齿围沙蚕 (*Perinereis aibuhitensis*) 生物量变化规律的研究[J]. 南京师大学报 (自然科学版), 1993, 16(1): 55-60.
Zhao Qingliang, Zhao Qiang, Xu Jiazhu. A study of annual fluctuation of biomass of *Perinereis aibuhitensis* in Qidong, Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 1993, 16(1): 55-60.
- [31] Ibñez C, Curco A, John W D J, et al. Structure and productivity of microtidal Mediterranean coastal marshes[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 107-136.
- [32] Villar C A, De C L, Vaithianathan P, et al. Litter decomposition of emergent macrophytes in a floodplain marsh of the Lower Paraná River[J]. Aquatic Botany, 2001, 70(2): 105-116.
- [33] Sousa A I, Pardal M A. Contribution of *Spartina maritima* to the reduction of eutrophication in estuarine systems[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 628-635.
- [34] 李加林, 杨晓平, 童亿勤, 等. 互花米草入侵对潮滩生态系统服务功能的影响及其管理[J]. 海洋通报, 2005, 24(5): 33-38.
Li Jialin, Yang Xiaoping, Tong Yiqin, et al. Influences of *Spartina alterniflora* invasion on ecosystem services of coastal wetland and its countermeasures[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(5): 33-38.
- [35] 叶妙水, 钟克亚, 张桂和, 等. 盐生经济作物北美海蓬子与盐渍地生态环境改造[J]. 草业科学, 2006, 23(6): 6-14.
Ye Miaoshui, Zhong Keya, Zhang Guihe, et al. Halophytic cash crop *Salicornia bigelovii* Torr. and saline land environment reconstruction[J]. Pratacultural Science, 2006, 23(6): 6-14.
- [36] 周泉澄, 华春, 周峰, 等. 毕氏海蓬子和盐角草幼苗抗氧化酶与渗透物质对海水浇灌的适应性研究[J]. 中国草地学报, 2010, 5: 101-105.
Zhou Quancheng, Hua Chun, Zhou Feng, et al. Study on adaptability of antioxidant and osmoregulation substance in seedling of *Salicornia bigelovii* Torr. and *Salicornia europaea* L. watered with artificial seawater[J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 5: 101-105.
- [37] Bowler C M, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 1992, 43(1): 83-116.
- [38] 肖雯, 贾恢先, 蒲陆梅. 几种盐生植物抗盐生理指标的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 5: 818-825.
Xiao Wen, Jia Huixian, Pu Lumei. Studies on physiological index of some halophytes[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 5: 818-825.
- [39] 姜丹, 李银心, 黄凌风, 等. 盐度和温度对北美海蓬子在厦门海区引种以及生长特性的影响[J]. 植物学通报, 2008, 5(5): 533-542.
Jiang Dan, Li Yinxin, Huang Lingfeng, et al. Effects of salinity and temperature on introduction and cultivation of the Euhalophyte *Salicornia bigelovii* Torr. in the Xiamen Ambient Sea[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2008, 5(5): 533-542.
- [40] Brown J J, Glenn E P, Fitzsimmons K M, et al. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent[J]. Aquaculture, 1999, 175(3): 255-268.
- [41] 郑春芳, 陈琛, 彭益全, 等. 海水养殖废水灌溉对碱蓬和海蓬子生长和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(4): 663-669.
Zheng Chunfang, Chen Chen, Peng Yiquan, et al. Effects of irrigation with saline aquaculture wastewater on growth and quality of *Suaeda salsa* and *Salicornia bigelovii*[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012,

- 24(4): 663-669.
- [42] 张美霞, 刘兴宽. 北美海蓬子引种盐城滩涂后生长条件和营养成分比较[J]. 食品科技, 2007, 5: 104-106.
Zhang Meixia, Liu Xingkuan. Study on the planting condition and the nutritious component of samphire after its introduction into Yancheng[J]. Food Science and Technology, 2007, 5: 104-106.
- [43] Biles C L, Paterson D M, Ford R B, et al. Bioturbation, ecosystem functioning and community structure[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2002, 6(6): 999-1005.
- [44] Levin L A, Boesch D F, Covich A D, et al. The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity[J]. Ecosystems, 2001, 4(5): 430-451.
- [45] Laverock B, Tait K, Gilbert J A, et al. Bioturbation: impact on the marine nitrogen cycle[J]. Biochemical Society Transactions, 2011, 39(1): 315.
- [46] Meysman F J, Middelburg J J, Heip C H. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(12): 688-695.
- [47] Riisgard H U, Bant G T. Irrigation and deposit feeding by the lugworm *Arenicola marina*, characteristics and secondary effects on the environment-A review of current knowledge[J]. Vie et Milieu, 1998, 48(4): 243-257.
- [48] Volkenborn N, Meile C, Polerecky L, et al. Intermittent bioirrigation and oxygen dynamics in permeable sediments: An experimental and modeling study of three tellinid bivalves[J]. Journal of Marine Research, 2012, 70(6): 794-823.
- [49] Pelegri S P, Blackburn T H. Bioturbation effects of the amphipod *Corophium volutator* on microbial nitrogen transformations in marine sediments[J]. Marine Biology, 1994, 121(2): 253-258.
- [50] Satoh H, Nakamura Y, Okabe S. Influences of infaunal burrows on the community structure and activity of ammonia-oxidizing bacteria in intertidal sediments[J]. Apply Environmental Microbiology, 2007, 73(4): 1341-1348.
- [51] Shull D H, Benoit J M, Wojcik C, et al. Infaunal burrow ventilation and pore-water transport in muddy sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 83(3): 277-286.
- [52] Norling K, Rosenberg R, Hulth S, et al. Importance of functional biodiversity and species-specific traits of benthic fauna for ecosystem functions in marine sediment[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 332: 11-23.
- [53] Stauffert M, Cravo-Laureau C, Duran R. Structure of hydrocarbonoclastic nitrate-reducing bacterial communities in bioturbated coastal marine sediments[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, 89(3): 580-593.
- [54] Stief P. Stimulation of microbial nitrogen cycling in aquatic ecosystems by benthic macrofauna: mechanisms and environmental implications[J]. Biogeosciences, 2013, 10(12): 7829-7846.
- [55] Fanjul E, Grela M A, Iribarne O. Effects of the dominant SW Atlantic intertidal burrowing crab *Chasmagnathus granulatus* on sediment chemistry and nutrient distribution[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 341: 177-190.
- [56] Welsh D T, Castadelli G. Bacterial nitrification activity directly associated with isolated benthic marine animals[J]. Marine Biology, 2004, 144(5): 1029-1037.
- [57] Welsh D T, Nizzoli D, Fano E A, et al. Direct contribution of clams (*Ruditapes philippinarum*) to benthic fluxes, nitrification, denitrification and nitrous oxide emission in a farmed sediment[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 154: 84-93.
- [58] Honda H, Harui K. Nitrogen budget of polychaete *Perinereis nuntia vallata* fed on the feces of Japanese flounder[J]. Fisheries Science, 2002, 68(6): 1304-1308.
- [59] 江小桃, 谭烨辉, 柯志新, 等. 投放双齿围沙蚕和马尾藻对养殖底泥上覆水氮、磷含量的影响[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 129-134.
Jiang Xiaotao, Tan Yehui, Ke Zhixin, et al. Effects of introduction of *Perinereis aibuhitensis* and *Sargassum hemiphyllum* on nitrogen and phosphorus in overlying water[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(4): 129-134.
- [60] 杨国军, 关宇, 宋永刚, 等. 多毛类沙蚕在沿岸海洋污染环境中的生物修复作用[J]. 河北渔业, 2012, 8: 50-55.
Yang Guojun, Guan Yu, Song Yonggang, et al. The role of polychaete nereis in bioremediation of coastal marine polluted environment[J]. Hebei Fisheries, 2012, 8: 50-55.
- [61] 牛俊翔, 蒋玫, 李磊, 等. 滩涂贝类养殖区底质硫化物的去除及修复[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1467-1472.
Niu Junxiang, Jiang Mei, Li Lei, et al. Study on restoration of sulfide in sediment environment of shellfish mudflat culture areas[J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(7): 1467-1472.
- [62] 陈惠彬. 渤海典型海岸带滩涂生境, 生物资源修复技术与示范[J]. 海洋信息, 2005, 3: 20-23.
Chen Huibin. Research and demonstration of the technologies of restoring the typical coastal zone tidal-flat habitat and the living resources in the Bohai Sea[J]. Marine Information, 2005, 3: 20-23.
- [63] Francis C A, Beman J M, Kuypers M M. New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation[J]. The

- ISME Journal, 2007, 1(1): 19-27.
- [64] Kumar V J R, Sukumaran V, Achuthan C, et al. Molecular characterization of the nitrifying bacterial consortia employed for the activation of bioreactors used in brackish and marine aquaculture systems[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 78: 74-81.
- [65] Seitzinger S P, Nixon S W. Eutrophication and the rate of denitrification and N_2O production in coastal marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1985, 30(6): 1332-1339.
- [66] Dahab M F, Sirigina S. Nitrate removal from water supplies using bionitrification and Gac-sand filter systems[J]. Water Science & Technology, 1994, 30(9): 133-139.
- [67] Mohseni-Bandpi A, Elliott D J, Momeny-Mazdeh A. Denitrification of groundwater using acetic acid as a carbon source[J]. Water Science & Technology, 1999, 40(2): 53-59.
- [68] 刘咏, 毕井辉, 陈干, 等. 巢湖芦苇湿地去除硝酸盐污染的调查与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 3: 421-425.
- Liu Yong, Bi Jinghui, Chen Gan, et al. Investigation and analysis of denitrification in natural reed wetland near Chaohu Lake[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2010, 3: 421-425.
- [69] 全为民, 沈新强, 甘居利, 等. 海洋沉积物中反硝化细菌的分离及去除硝酸盐氮的模拟试验[J]. 海洋渔业, 2005, 3: 46-52.
- Quan Weimin, Shen Xinqiang, Gan Juli, et al. Isolation of denitrifying bacteria in sea sediment and simulated experiment of removing nitrate from seawater[J]. Marine Fisheries, 2005, 3: 46-52.
- [70] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [71] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- [72] Cheng Yi, Cai Zucong, Chang Jibo, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated Black Chernozem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(8): 941-946.
- [73] Yu Liujian, Tang Jia, Zhang Renduo, et al. Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture levels[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(2): 119-128.
- [74] Khodadad C L M, Zimmerman A R, Green S J, et al. Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2): 385-392.
- [75] Mermillod-Blondin F, François-Carcaillet F, Roseberg R. Biodiversity of benthic invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: an experimental study[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 315(2): 187-209.
- [76] Warnock D D, Mummey D L, McBride B, et al. Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: results from growth-chamber and field experiments[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(3): 450-456.
- [77] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(12): 2067-2073.
- [78] Song Yanjing, Zhang Xiaoli, Ma Bin, et al. Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(2): 321-332.
- [79] Oishi R, Tada C, Asano R, et al. Growth of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in cattle manure compost under various temperatures and ammonia concentrations[J]. Microbial Ecology, 2012, 63(4): 787-793.
- [80] 张小远, 肖瑶, 田浩, 等. 贝壳砂改良土壤中反硝化细菌的分析[J]. 微生物学通报, 2014, 41(1): 35-42.
- Zhang Xiaoyuan, Xiao Yao, Tian Hao, et al. Analysis of denitrifying bacteria in a long-term shell sand amended soil[J]. Microbiology, 2014, 41(1): 35-42.
- [81] Boodhoo D. Biofarming, a step towards sustainable agriculture[J]. Réduit Reporter, 1992, 1(1): 29-30.
- [82] 陈聚法, 张东杰, 宋建中, 等. 乳山湾缢蛏养殖老化滩涂的修复研究[J]. 渔业科学进展, 2005, 5: 57-61.
- Chen Jufa, Zhang Dongjie, Song Jianzhong, et al. Experimental study on restoration of aged beach for culturing *Sinonovacula constricta* in Rushan Bay[J]. Marine Fisheries Research, 2005, 5: 57-61.
- [83] 马绍赛, 辛福言, 张东杰, 等. 乳山湾菲律宾蛤仔养殖滩涂老化修复实验研究[J]. 渔业科学进展, 2005, 26: 59-61.
- Ma Shaosai, Xin Fuyan, Zhang Dongjie, et al. Studies on short-necked clam culture in the recovery areas of Rushan Bay[J]. Marine Fisheries Research, 2005, 26: 59-61.
- [84] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition: a review[J]. Journal of Marine Systems, 1997, 11(3): 269-278.
- [85] Bouchet V M, Sauriau P G. Influence of oyster culture practices and environmental conditions on the ecological status of intertidal mudflats in the *Pertuis Charentais* (SW France): a multi-index approach[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(11): 1898-1912.
- [86] Callier M D, Weise A M, McKindsey C W, et al. Sedimentation rates in a suspended mussel farm (Great-Entry Lagoon, Canada): biodeposit production and dispersion[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006,

- 322: 129-141.
- [87] 姚炜民, 周燕, 沙伟, 等. 应用数值模拟方法计算小尺度海域养殖容量[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 432-438.
Yao Weimin, Zhou Yan, Sha Wei, et al. Application of numerical value simulation in estimating the carrying capacity of small-scale sea area[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(4): 432-438.
- [88] 张明亮, 王宗灵. 浅海贝类养殖容量研究[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 106-111.
Zhang Mingliang, Wang Zongling. Studies of shellfish carrying capacity in shallow sea[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 106-111.
- [89] Meixner T, Fenn M. Biogeochemical budgets in a mediterranean catchment with high rates of atmospheric N deposition-importance of scale and temporal asynchrony[J]. Biogeochemistry, 2004, 70(3): 331-356.
- [90] Avrahami S, Conrad R, Braker G. Effect of soil ammonium concentration on N₂O release and on the community structure of ammonia oxidizers and denitrifiers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(11): 5685-5692.
- [91] Bird F L, Boon P I, Nichols P D. Physicochemical and microbial properties of burrows of the deposit-feeding thalassinidean ghost shrimp *Biffarius arenosus* (Decapoda: Callianassidae)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(3): 279-291.
- [92] Herbert R B, Winbjörk H H, Hallin S. Nitrogen removal and spatial distribution of denitrifier and anammox communities in a bioreactor for mine drainage treatment[J]. Water Research, 2014, 66: 350-360.
- [93] Laverock B, Tait K, Gilbert J A, et al. Impacts of bioturbation on temporal variation in bacterial and archaeal nitrogen-cycling gene abundance in coastal sediments[J]. Environ Microbiol Rep, 2014, 6(1): 113-121.
- [94] Papaspyrou S, Smith C J, Dong L F, et al. Nitrate reduction functional genes and nitrate reduction potentials persist in deeper estuarine sediments. Why?[J]. PLoS One, 2014, 9(4): 1-9.
- [95] Papaspyrou S, Gregersen T, Cox R P, et al. Sediment properties and bacterial community in burrows of the ghost shrimp *Pestarella tyrrhena* (Decapoda: *Thalassinidea*)[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2005, 38(2): 181-190.
- [96] Vasileiadis S, Coppolecchia D, Puglisi E, et al. Response of ammonia oxidizing bacteria and archaea to acute zinc stress and different moisture regimes in soil[J]. Microbial Ecology, 2012, 64(4): 1028-1037.

Review of research on bioremediation in the eutrophication of intertidal flats

SHEN Hui^{1, 2}, WAN Xi-he¹, HE Pei-min²

(1. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Aug. 7, 2015

Key words: Intertidal flats; eutrophication; bioremediation

Abstract: In recent years, due to the process of eutrophication in sea water, the sediments in the intertidal flats have been eutrophicated. The biodiversity of the tidal flats and various important physical and chemical parameters such as dissolved oxygen capacity have declined significantly. Meanwhile, levels of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen have increased significantly, resulting in habitat degradation in the tidal flats. Several studies have been carried out on bioremediation to restore the ecological environment of the intertidal flats. This article summarizes the current situation of eutrophication in the tidal flats; reviews the principle, characteristics, and consequences of the various bioremediation methods; and compares the merits and demerits of these restoration techniques. The key points of application of bioremediation for eutrophicated intertidal flats are also summarized, and future research directions of bioremediation in applied ecology and environmental protection are put forward.

(本文编辑: 谭雪静)