第 38 卷　第 8 期　　海　洋　学　报　　Vol. 38, No. 8
2016 年 8 月　　Haiyang Xuebao　　August 2016

林磊,刘东艳,刘哲,等. 围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. 海洋学报,2016,38(8):1—11, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2016.08.001

Lin Lei, Liu Dongyan, Liu Zhe, et al. Impact of land reclamation on marine hydrodynamic and ecological environment[J]. Haiyang Xuebao,2016,38(8):1—11, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2016.08.001

围填海对海洋水动力与生态环境的影响

林磊[1],刘东艳[2*],刘哲[1],高会旺[1]

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室,山东 青岛 266100; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,山东 烟台 264003)

摘要: 近 10 年来,中国海岸带围填海活动呈现出规模大、速度快的发展态势。围填海能带来显著的经济效益,但对海洋环境与生态的负面影响也不可忽视。针对围填海对海洋环境和生态的影响及作用机制,分别从水动力和生态系统两个方面进行了概述。围填海改变了海洋的自然几何属性(原始岸线、地形地貌、海湾面积),引起水动力环境的变化(潮汐系统和海湾水交换能力),进而影响了海湾的环境容量;围填海破坏了生物栖息地、导致生物多样性的丧失,影响到生态系统结构与功能的稳定性;水动力与生物多样性的变化可显著影响到生物地球化学过程,加速富营养化进程,恶化水质,增加生态灾害风险。目前,围填海后的生态修复策略主要有增加生物量、建设自然保护区、退陆还海 3 种方式;而生态补偿策略则多基于"生态系统服务功能与生境面积的大小为线性关系",通过对其经济价值的量化后进行生态补偿与实施相关政策。国际上,生态系统服务功能的量化参数逐步纳入实际管理,并在线性关系研究的基础上,逐步纳入一些非线性的理念,使生态补偿机制更为合理化;而我国对于围填海生态效应的定量化研究及科学理论在管理政策中的实际应用仍亟待提高。整体而言,全面、准确地评估围填海对海洋环境与生态的影响离不开自然科学与社会科学的交叉与融合。

关键词: 围填海工程;水交换;环境容量;生态系统服务功能;生态修复与补偿

中图分类号: X820　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-4193(2016)08-0001-11

1　引言

围填海造陆是人类扩大生存发展空间,解决"人地矛盾"的重要手段之一,最早可追溯到春秋战国时期。工业革命以前,填海目的多以农垦为主,规模小、周期长;而工业革命以后,工业化与建设用地比重逐步增多,同时,由于技术和设备发展迅速,扩大了围填海的规模,且大幅度缩短了工程周期[1]。中国人口居世界之最,经济发展迅速,人地矛盾突出,已成为世界上每年围填海最多的国家。据不完全统计,从 1949 年到 20 世纪末,中国围填海面积约为 11 000～12 000 km^2,平均每年填海面积 210～220 km^2,"十五"期间(2000－2005 年),每年填海造陆接近 300 km^2,"十一五"期间(2006－2010 年),增加到每年 700 km^2,呈现

收稿日期: 2016-01-12;**修订日期:** 2016-03-01。

基金项目: 科技部基础性工作专项"我国典型潮间带沉积物本底及质量调查与图集编研"(2014FY210600);山东省自然科学杰出基金(JQ201414);新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-13-0529);海洋公益性行业科研专项经费项目(200805011);国家自然科学基金委员会——山东人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406403)。

作者简介: 林磊(1987—),男,山东省栖霞市人,博士研究生,主要从事海洋环境动力学研究。E-mail:linlei24@126.com

* **通信作者:** 刘东艳(1973—),女,山东省青岛市人,研究员,主要从事海洋藻类生态学研究。E-mail:dyliu@yic.ac.cn

出规模大、速度快的态势[2]。“十二五”规划把海洋提升为国家发展战略，全国各地沿海省份都在积极布局海洋战略，实施新一轮开发，加快培育沿海地区新的经济增长点。以交通运输部为例，已批复的 18 个沿海港口发展规划将占用 2 251 km 岸线、1 251 km^2 陆域以及 1 615 km^2 锚地用海，仅 18 个未来大型港口岸线就占大陆岸线总长的 13%[3]。

围填海在一定程度上缓解了人地矛盾，给社会带来了显著经济效益，但另一方面，缺乏科学指导的围填活动可对生态环境产生显著负面效应，破坏生态系统服务功能，甚至形成安全隐患。例如，在 20 世纪 80 年代，山东省无棣县与沾化县大规模的围填海使岸线向海推进了数 10 km，潮间带宽度锐减，严重削弱了岸滩对强潮的抵抗力，1997 年和 2003 年遭受了两次特大风暴潮袭击，两县淹没土地 5 万 hm^2，形成巨大的经济损失[4]，而如此密集和大规模的海洋灾害在当地史无前例。

西方发达国家早在 20 世纪，就提出了“保护与开发并重”的理念，强调从经济－环境－社会三方面综合权衡围填海的得失，并逐渐将生态系统的理论运用到管理概念中，将自然科学与社会科学结合并纳入管理系统[5－6]。然而，国内相关研究十分滞后，最近 10 年才有研究陆续开展，但已经引起科学家的高度关注。2010 年的院士咨询报告“我国围填海工程中的若干科学问题及对策建议”中明确提出应高度重视围填海对近海生态系统的影响[7]；2010 年，中国环境与发展国际合作委员会年会的国合会报告，将围填海对近海生态系统的影响做为单列议题；在陆－海相互作用大框架下，围填海对海洋经济资源的影响也正成为重要研究内容[8]。因此，了解围填海对海洋环境与生态的影响，揭示其作用机制，并形成科学的围填与应对策略，是海岸带经济开发过程中迫切需要应对的环境问题。本文通过对国内、外大量围填海案例的综合阅读分析，阐述围填工程对海洋水动力环境以及生态系统的影响与机制，以及相关的修复与补偿策略。此外，以中国胶州湾作为典型案例，讨论分析了海湾围填海的综合环境效应，以期为中国围填海环境与生态效应的研究、相关规划与管理等工作提供科学依据。

2 围填海对海域水动力环境的影响

海洋中水是物质和生物的载体，海洋的水动力过程对海水中物质输运与生物过程起到重要作用。围填海对海洋水动力过程的影响主要表现为：通过改变原始岸线、地形地貌和缩小海湾的面积、容积引起近海潮汐系统和海湾水交换能力的变化。在海洋水动力系统稳定性较弱的小海湾，围填海的影响更为明显。

2.1 围填海改变了海域的自然属性

围填海对施工海域最直接的影响就是改变了海域原有的自然几何属性，包括海岸形状、海域面积、海湾容量和海底地形地貌等。围填海施工时，考虑到成本节省，多对原有岸线进行截弯取直，从而改变了海岸线长度和形态，使海岸线长度变短，趋于平直[9]。如，1990－2005 年，填海造地使得大连市海岸线缩短了 93.4 km，与此同时，自然岸线的比重也由原来的 64.8%下降到了 56.1%，海岸自然结构发生了显著的变化[10]。其次，围填海可极大缩减海域面积，尤其是潮间带。据不完全统计，在过去的半个世纪中，中国的围垦活动已导致黄海周边 65%的潮滩消失[11]；中国围填海面积超过 50 km^2 的海湾有 16 个之多[12]。此外，围填海工程以及人工岛的建设还会直接破坏海底的平衡态，改变沉积物输运格局，导致海底地形地貌发生非自然演变[13]。如荷兰 Wadden 海内泥滩的逐渐消失正是由于围填海造成的[14]；在韩国新万金海域，围填海工程则导致沿人工堤坝的海底受到强烈侵蚀，形成了几条较深的海槽和水道[15]。

2.2 围填海对近海潮动力过程及海湾水交换的影响

近海的海水运动主要以潮为主，在海岸线上的围填活动改变岸线结构，影响了潮波反射的位置和方向，从而导致潮流的流速、流向以及潮汐的振幅、迟角的变化。在韩国的新万金附近海域，Choi 等[16]通过数值模拟发现了筑坝工程导致 M_2 分潮振幅减小 8～10 cm，迟角减小约 3.5°；Park 等[17]进一步探究了该影响的机制，发现岸线改变对潮波反射的影响是潮振幅减小的根本原因。围填海对潮的影响不仅仅产生于局地海域，对远离围填的海域也存在显著影响，通常称为远区效应(far-field effect)[18]。例如，对中国海岸带潮滩区域的围填会导致渤、黄、东海潮波的振幅、迟角以及无潮点的变化；韩国西海岸的围填海工程使得山东、江苏及长江口等地沿海潮流、潮汐系统都受到影响[16,18－19]。这些研究表明，围填海施工时仅仅考虑其对当地海域的影响可能是不够的，规模较大的围填海工程可能需要进行跨市、跨省甚至跨国家之间的评估、协调。

海湾内的围填工程通常会导致湾内潮流减弱，主要动力机制是由于围填海缩小了海湾的空间尺度，减

小了驻波型潮波反射距离所致[20]。如从 1968 年到 1983 年,由于海湾面积的缩小,日本的东京湾湾口流速减弱了约 20%[21]。这类现象在日本的 Ariake 湾[22]、中国福建的多个海湾[23]、浙江的象山港[24]、杭州湾[25]、辽宁的锦州湾[26]等地都有发现。海湾容积的减小和潮流的减弱将降低海湾的水交换能力,并导致其环境容量减小和纳污能力减弱[27]。如鲍献文等[23]通过数值模拟的方法对福建省 10 多个海湾进行评价,发现受围填海的影响,这些海湾潮流都存在不同程度的衰退,水交换能力基本呈下降趋势。然而,并非是所有情况下的围填海都会削弱海湾的水交换能力,Okada 等[28]发现在日本东京湾围填海反而减小了海湾的水体存留时间,增强了水交换,究其原因是由于该海湾与外海水交换是由河流径流带来的斜压环流所主导,而非潮流,围填海使得海湾容积减小,径流不变情况下海湾盐度与外海梯度增大,从而增强了斜压环流,水交换也随之增强。因此,围填海对海湾水交换的影响与该海湾水动力的性质有关,应分情况考虑。

3　围填海对海域生态环境的影响

海洋生态系统的健康程度是海洋生命力强弱的重要表征,围填海对海域自然属性的改变、施工过程产生的污染物、以及围填海形成的负面环境效应,都将会对海域的生态系统产生不同程度的影响。

3.1　直接影响:破坏栖息地、生物多样性大量丢失

生物多样性的变化可显著影响到生态系统结构与功能的稳定性。重要功能群的消失可产生多米诺骨牌效应,引起其他物种在数量上的减少甚至完全消失,导致生态服务功能丧失。围填海对生物栖息地与生物多样性的破坏作用是直接的、显著的,很多描述性研究已经阐明了这一现象。甚至,Sala 等在 Science 上撰文描述 2100 年全球生物多样性情景,指出土地利用和气候变化是导致生物多样性下降的最重要原因[29]。围填海的影响主要表现在两方面:一是由于直接在物种栖息地处的围填、掩埋,导致某些特定物种或部分物种无“家”可归,逐渐消亡。例如,英格兰东部的沃什湾潮滩围垦使得潮间带盐沼变窄,最终导致了雌麻鸭(Shelduck)和 7 种鸻亚目(Charadrii)涉禽的减少[30];渤海湾的围填海导致候鸟栖息地的大量缩减,仅存的栖息地内候鸟密度急剧增加,濒临崩溃的边缘[31];江苏沿海滩涂的围垦导致了围垦区内沙蚕在一两个月内快速绝迹[32]。二是围填间接导致生境环境因子的突然改变(如水温、盐度、营养盐、沉积物特性等),影响了物种的生存和演替,导致生物多样性的破坏。例如,韩国 Donggum-do 东部盐土植物山茶的突然消失是由于海岸工程减弱了潮流增加了海域沉积速率,并超过了发芽的临界值,导致了该物种的快速消亡[33];1997 年日本的谏早湾内堤坝的建成,隔绝了其与外海的交换,海水盐度下降导致了本地 11 个海洋双壳类物种的快速死亡和外来物种的入侵[34];河口的大型围填海工程会彻底摧毁鱼类产卵场,施工时造成的高浓度悬浮颗粒扩散场会对相当大范围内的鱼卵、仔稚鱼造成伤害,或者引起滩涂湿地、海草床或珊瑚礁等生境退化,破坏了仔稚鱼的栖息地,而鱼卵和仔稚鱼是鱼类资源的补充和基础,进而影响到渔业总产量[35];Yan 等[36]估算了锦州湾海上机场建设过程中升高了海水悬浮物浓度造成的生态损失,若施工不当可能造成近 3.91 亿颗鱼卵、1.52 亿条幼鱼和 142 t 游泳生物死亡,渔业价值损失约合 200 万美元。

生物多样性在维持生物地球化学循环中发挥着重要作用,物种的大量减少可显著降低生态系统的自净功能。如大量元素随河流进入湿地,其溶解态的氮、磷可以被水生维管植物、海藻与海草床和藻类快速吸收,净化水体;而一些有机态的颗粒则会沉降下来,进入沉积物,成为底栖动物、浮游植物、细菌、真菌等生物的重要食物;而湿地盐沼维管植物通过植株—根系将光和作用产生的氧输送至湿地床,形成富氧微环境,为微生物的硝化和反硝化作用创造了条件,通过微食物环作用将无机物释放回水中,支撑生物地球化学循环系统[37—40]。因此,生物多样性的丧失让各种有机、无机物质在沉积环境中的不断积累、降解,改变了水体、沉积环境中的氧含量,影响底质和底层水的氧化还原电位、酸碱平衡、生物化学和物理化学过程,加剧了底质恶化与水体的富营养化。

3.2　间接影响:生态灾害增多

围填海极易加剧海水富营养化过程,由于围填海后海域水交换能力可能减弱或环境容量减小,以及水动力变化导致各种物质的分配、转移、扩散发生改变,从而对海洋生物地球化学循环过程形成持久性影响。如韩国新万金堤坝的建造减弱了附近水域的水动力,导致污染物不易交换出去,近岸赤潮、低氧等环境问题频发[41];Li 等[42]利用数值模拟方法开展乐清湾潮流及半交换时间的研究结果显示填海工程使得水交换时间增加了 1～6 d,造成污染物无法及时输出,是

导致乐清湾成为国内污染最为严重的 8 个近岸海域之一的重要原因，夏季赤潮频发，对生态系统形成严重影响。

同时，围填海材料的使用和围填海施工过程会导致水质恶化，潮滩填埋垃圾会使其中的有机质、污染物渗入地下水和沿海水域，造成水域的污染[43]；污染物通过食物链进入生态系统，进而可能引发各种人类的疾病，已有的研究证明重金属具有显著的生物富集和沿食物链生物放大效应，既能被海洋鱼类和贝类体表吸附，也可被生物体直接吸收，并沿食物链传递，通过食品渠道，危害人类食物安全和健康[44]。如世界闻名的“公害病”——水俣病就是由汞污染后在海产品中富集并被人食用引起的。黄、渤海沿岸已是中国持久性有机污染物和重金属污染最为严重的海域之一[45—46]，在黄海底栖贝类体内，滴滴涕和石油烃的超标率分别为 15.2% 和 21.4%[47]，尽管目前大量的研究表明河流输入是各种污染物的重要通道，未有调查与研究明确指出海洋中汞与持久性有机物的来源与围填海有必然联系，但围填海尤其是使用垃圾填埋后的释放有可能是其中的源头之一，目前很少有研究去估算这种大规模围填海形成的局地污染效应。

4 案例分析：胶州湾围填海及环境效应

胶州湾是典型的半封闭海湾，有着长期、持续的、较大规模的围填海历史（图 1），研究资料丰富，具有代表性，因此本节以胶州湾为例，综合分析围填海活动对海湾水环境与生态的影响。

根据 Shi 等[48]的研究，胶州湾围填海主要经历了几个发展的阶段：1935 年之前主要是自然演变过程，从 1935 年到 1966 年，在胶州湾北部潮滩，大量盐池和虾塘的围建使得总面积减小近 18%，在此期间红岛由原来的孤岛变为陆连岛；从 1966 年到 1986 年，大面积的潮间带被围填，导致潮滩面积减小了 30%，黄岛也变成了陆连岛；1986 年到 2000 年，围填海多在内湾进行，整个海湾的海岸线几乎都受到围填影响而发生改变；2000 至 2008 年，由于港口和码头的建设需要，围填海主要在靠近湾口的外湾进行，内湾的面积基本保持不变。经过了几次较大规模的围填海之后，胶州湾的水域面积已由 1935 年的 555 km^2 缩减到 2008 年的 349 km^2，面积减小了 37%。其中，潮滩围填面积达 186 km^2，占总围填面积的 90%以上。海岸线长度由 215.76 km 缩减到 178.06 km，缩短了近 17%，目前已经有 90%的岸线变为人工岸线[49]。

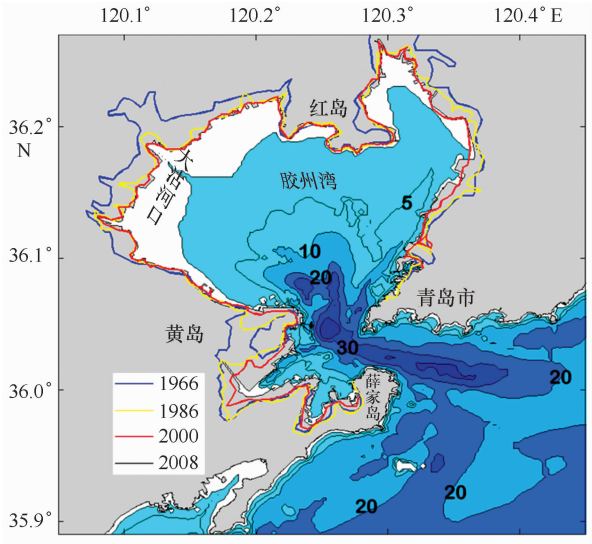

图 1 胶州湾 1966—2008 年间的岸线变化（岸线数据提取自文献[50]）

Fig. 1 The variation of shoreline in Jiaozhou Bay during 1966 to 2008 (redrawn from reference [50])

围填海导致胶州湾水动力衰退，潮流、余流都有不同程度的减弱，纳潮量逐渐减小（图 2）。潮流受影响最大的、对填海最敏感的区域是湾口。王学昌等[51]对比了不同填海方案，发现不管哪种方案都会使得湾口流速减小；根据 Shi 等[48]的模拟结果，相比于 1966 年，湾口平均流速减小了 18%左右；Lou 等[52]利用数值模拟研究了外湾港口、码头建设对潮、余流的影响，结果发现，其对内湾影响不大，而湾口则有较大改变（流速变化 7.7%～65.6%，余流变化 29.50%～70.05%）；胶州湾大桥的桥墩也使得湾口处的潮、余流场发生显著变化，最大处有 40 cm/s 的改变[53]；Lin 等[20]根据潮波驻波特性分析得到湾口是在围填海影响下流速变化幅度最大的地区，并由水体连续性推导出，在类似胶州湾的小尺度海湾内，围填海面积的增加与湾口流速减小近似呈线性关系。

同时，胶州湾水交换能力受到围填海影响发生改变。从 1966 年至 2008 年，胶州湾整体的水交换率逐渐减小，其中，30 d 水交换率减小了 7.5%[54]。Shi 等[48]通过对湾内水体平均存留时间的数值研究指出，在过去的几十年中，围填海减弱了胶州湾水交换能力，尤其在 80 年代以后更为严重，湾顶东北角水体平均存留时间增加超过 50%。而纳潮量的降低和水交换能力的下降直接导致了胶州湾环境容量的减小[55]，由此引发胶州湾对排湾污水的承载能力和水环境质量的下降。从 90 年代中期开始，胶州湾赤潮

发生频率迅速增加,除了污水排放、养殖活动、河流输入的影响之外,我们不得不考虑环境容量与自净能力降低加速了海湾的富营养化过程[56]。此外,近几十年来,受围填海等人类活动的影响,胶州湾生态功能逐渐退化,生物多样性锐减。如 20 世纪 60 年代沧口潮间带的生物种类有 141 种,70 年代减为 30 种,80 年代只剩 17 种,至 90 年代生物种类则少于 10 种[57],浮游植物的多样性也呈现下降趋势,平均多样性指数由 1981 年的 1.09 降到 2003 年的 0.69[56]。经估算,由围填海造成的胶州湾海洋生态系统服务功能和滨海湿地生境服务功能的价值损失分别达到 22 732.75 万元/年[58]和 4 264 万元/年[59]。由此可见,短期内围填海对海洋环境与生态造成的巨大影响和潜在的经济损失。

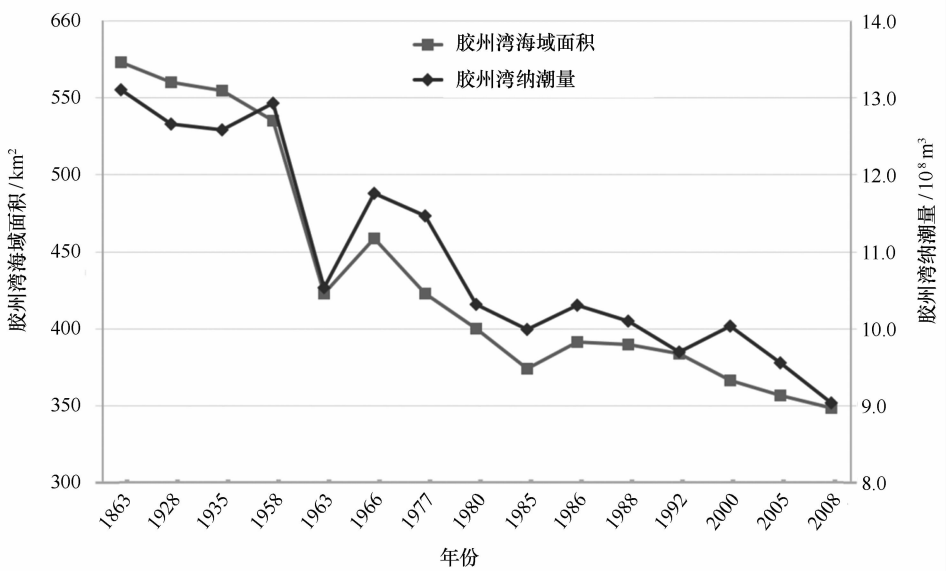

图 2　胶州湾海域面积及纳潮量变化(由文献[48－49,60－68]资料汇总而得)

Fig. 2　The change of water area and tidal prism of Jiaozhou Bay (according to the data collected from references [48－49,60－68])

5　围填海影响的总结与讨论

围填海对海域水动力环境以及生态系统结构与功能的影响十分显著。经过对其影响及机制的调查,不难发现,这些影响并不是孤立的,它们之间存在密切联系,可归纳总结如图 3。围填海施工过程中对周围海域环境的扰动、所使用的填埋材料的释放会对海域水质造成影响,导致其恶化(例如,锦州湾海上机场建设[36]和上海南汇县老港垃圾码头[43]对水质的污染);围填海工程直接导致海岸带与海域的消失,即海域岸线、地形等自然属性的变化,这使得原本依托于该地区的生物栖息地消失外(如江苏沿海滩涂的围垦导致沙蚕绝迹[32]),其对海域水动力也造成直接、快速而强烈的影响,作为海洋中物质输运的驱动力,水动力状况发生改变后引发了海水温度、盐度、水交换(自净)能力、水质(污染物、营养盐等物质的时空分布)及沉积速率等一系列环境因子的变化,这体现了"水动力"在该影响关系网中起着枢纽中心的作用,这些环境因子的变化直接对海域的环境容量与生态系统的造成影响,从而产生污染物浓度超标、富营养化、赤潮等严重的环境问题(如胶州湾水交换能力的减弱和生态功能退化;日本的谏早湾本地物种的快速死亡和外来物种的入侵[34];韩国新万金堤坝内赤潮等环境问题的形成[41]等),这也是目前研究围填海对海洋影响的主要目的和出发点;同时,某些环境因子的改变也伴随着反馈作用,如海水温度、盐度变化后会影响斜压环流(例如,日本东京湾斜压环流的增强[29]),从而对海域,尤其是河口区附近的水动力格局产生影响,沉积速率变化可影响海底地形、地貌的演变(如围填海造成荷兰 Wadden 海内泥滩的消失[14]);最终,生物多样和群落结构的改变直接威胁到与人类食品和安全最为相关的海洋生物资源与可持续利用。

总的来说,在海洋环境中,水体作为生物和物质的载体,水动力的改变引起的水体交换和物质输运变

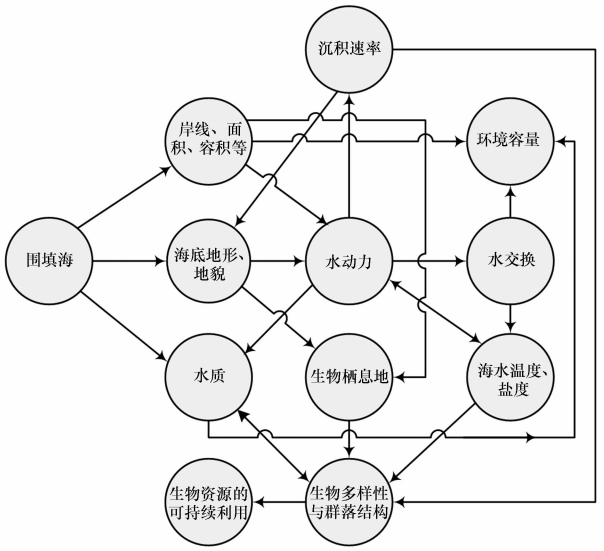

图 3 围填工程对海洋环境与生态的影响框架图

Fig. 3 The schematic diagram showing the impact of land reclamation on the marine environment and ecosystem

化会对生物和化学过程造成长期持续性影响，而生物多样性与生物地球化学过程之间又存在密切联系，进而影响生态系统结构与功能。因此，对围填工程的环境生态效益进行评价时，需综合考虑这些方面的后果，片面与盲目开展的围填海工程可能会“牵一发而动全身”，造成整个水域生态系统严重的、不可恢复的破坏，工程实施前应慎之又慎。

6 围填海的生态修复与管理策略

目前，发达国家对围填海项目的开发慎之又慎，其研究工作也从海洋资源可持续开发、利用的角度出发，兼顾保护生态环境与最大限度地满足国家与地方经济发展的需要，评价围填海造地的生态环境效益、经济效益、社会效益，并在此基础上获取围填海造地的最大综合效益[5]。由于生态系统是具有自组织作用的、受多要素和多过程共同控制的复杂系统，建立包含水文、生物地球化学、生态动态过程的水生生态系统模型仍然是评估围填海对生态系统影响最有效的量化手段[69]。目前，国外学者对生态过程与水文—生物地球化学过程耦合模型的发展更加实用，多与生态系统服务功能挂钩。例如，Simonit 和 Perrings[70] 通过研究湖边湿地围垦造成湖泊泄洪、湿地缓冲、营养盐调节及鱼类生产等生态服务功能降低，数值模拟了鱼类最大可持续产量与污染物的关系，综合评价围垦带来的损失。这些研究值得我们借鉴到海洋中，综合评估围填海的环境生态效应。

对于已经发生或正在发生的围填海活动，国内外生态修复的研究主要体现在 3 个方面：

一是人为增加海域生物量，对围填海后造成生态环境退化的区域进行生态修复。如，中国 2002—2004 年在长江口新建的南北导堤投放了共 15 t 底栖生物进行修复；美国加州利用人造礁石投入海底，对受核电站建设影响导致的海藻床面积锐减进行生态修复[71]。

二是在围填海的同时增加自然保护区。例如，荷兰鹿特丹港为满足 21 世纪中叶前的发展需要，近期实施 20 km^2 的围填海工程扩建，该工程从 20 世纪 90 年代提出方案，至 2008 年才开工建设，到 2013 年才能发挥作用，工程涉及的生态环境影响评估报告长达 6 000 余页。建设方案包括在邻近海域规划 250 km^2 的生态保护区、港池的外海侧建设 35 hm^2 休闲沙丘海滨、在邻近海岸带修整 750 hm^2 的休闲自然保护区等生态补偿措施[7]。

三是退陆还海。如，1990 年，荷兰农业部制定的《自然政策计划》，花费 30 年的时间恢复这个国家的“自然”，位于荷兰南部西斯海尔德水道两岸的部分堤坝被推倒，一片围海造田得来的 300 hm^2“开拓地”将再次被海水淹没，恢复为可供鸟类栖息的湿地。国内目前尚未有退海的案例，但湖泊方面，自 1998 年大洪水以后，国家在洞庭湖、鄱阳湖开展了大规模的“平垸行洪、退田还湖和移民建镇”，国务院提出“退田还湖”的方针。其中，1998 年至今，鄱阳湖已退田还湖面积超过 1 000 km^2[72]。恢复长江流域水域面积达 2 900 km^2，增加蓄洪容积 130 亿 m^3[73]。

中国海岸线漫长，具有复杂的区域性特征，因此，在进行围填海生态修复时，仍需考虑实际情况，进行论证、调整、评估，寻求适合该区域的方案。

在围填海的管理方面，我国由 20 世纪 90 年代前的无偿与支持逐渐过渡、发展为现在的有偿与限制，到 2006 年已建立了围填海相关的管理规定与制度，与之有关的制度主要包括环境影响评价制度、海域使用论证制度、海域有偿使用制度等[74]，但由于海域权属观念淡薄、缺少必要的法律法规和政策支持、多部门职能冲突、对海岸带缺乏综合规划和管理等原因，围填海相关的法律法规、管理制度与体制仍存在较大提升与完善的空间[75]。目前来看，充分利用海域有偿使用制度，实施生态损害补偿，已经被学术界和管理实践证明是控制围填海活动的较为有效环境经济

手段。国际学术界对生态补偿的一种定义是“生态系统服务付费”或者“环境服务付费”(Payments for Environmental Services,PES),即生态系统服务的受益者对生态系统服务的提供者进行直接支付的契约安排(Contractual Arrangements)[76]。因此,国内外学者多数基于“生态系统服务功能与生境面积的大小为线性关系”,通过对其经济价值的量化后进行生态补偿与政策实施。如,福建兴化湾规划于 2000－2020 年间进行 170 km^2 的滩涂围垦,将会使生态服务的年总价值由 2000 年的 44.5 亿元降至 2020 年的 34.8 亿元,损失幅度达到 21.77%[77]。然而,生态服务功能与经济价值之间的关系在很多情况下是非线性的。Barbier 等[6]通过对红树林、海草床、盐沼草和珊瑚礁等湿地的研究发现,如果只考虑围填海导致生境面积丢失的大小,而不考虑水动力变化的非线性调控作用,会高估或者低估围填海对红树林护岸功能的影响与经济价值。国内在该方面的研究还比较薄弱,已开展的类似研究是福建省海洋渔业厅 2007 年启动的“福建省海湾数模与环境研究”重大研究项目。该项目利用数值模型对福建省 13 个海湾围填海的社会、经济、环境影响进行了系统评估,并提出了围填海规划环境影响评价的技术导则。但该项研究更多侧重于系统评估,对围填海影响过程和机理涉及较少,不能从量化的角度确定围填海规模和生态系统维稳间的平衡点,缺乏对有序发展围填海与生态效益、环境效益、社会效益和经济效益间的科学契合。因此,合理量化围填海后环境变化与生态系统的响应关系,应是建立生态系统服务功能与经济价值关系的科学基础和研究方向。

7　小结

围填海对海洋环境和生态系统带来显著影响,水动力起到重要的枢纽作用。然而,目前的研究多使用数值方法来定量围填海对海域水动力的影响,对其影响潜在机制的解释和探讨较少,仍不能很好的指导围填海的科学管理和规划。对于环境、生态方面,多是现场取样观测等手段来量化围填海的影响,仍缺乏综合水动力、生物地球化学过程和生态系统的模型研究,故难以全面地预测、评估围填海的生态价值损失。在生态修复方面,不仅要开展对围填后的生态系统实行修复,还应提倡退陆还海的研究;在管理上,生态系统服务功能的量化参数应逐步纳入管理,并在线性关系研究的基础上,建立一些非线性的理念,使生态补偿机制更为合理化。这些研究需要将自然科学与社会科学交叉融合,才能将围填海的管理、规划策略建立在“基于生态系统”的水平上。

参考文献:

[1] Grau H R, Aide T M, Zimmerman J K, et al. The ecological consequences of socioeconomic and land-use changes in post-agriculture Puerto Rico[J]. BioScience, 2003, 53(12): 1159－1168.

[2] 朱高儒, 许学工. 填海造陆的环境效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 761－766.
Zhu Gaoru, Xu Xuegong. Research review on environmental effects of land reclamation from sea[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 761－766.

[3] 国家海洋局海洋发展战略研究所课题组. 中国海洋发展报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
China Institute for Marine Affairs. China's Ocean Development Report[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.

[4] 刘述锡, 孙淑艳, 于永海, 等. 围填海导致的生态问题和对策[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(12): 63－66.
Liu Shuxi, Sun Shuyan, Yu Yonghai, et al. Ecological problems induced by land reclamation and the strategy for it[J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(12): 63－66.

[5] DeFries R S, Foley J A, Asner G P. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2(5): 249－257.

[6] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values[J]. Science, 2008, 319(5861): 321－323.

[7] 苏纪兰, 王颖, 秦蕴珊, 等. 我国围填海工程中的若干科学问题及对策建议[R]. 北京: 院士咨询报告, 2010.
Su Jilan, Wang Ying, Qin Yunshan, et al. Several scientific problems and suggestions in the process of land reclamation in China[R]. Beijing: Consulting Report from Academician, 2010.

[8] 张经. 关于陆－海相互作用的若干问题[J]. 科学通报, 2011, 56(24): 1956－1966.
Zhang Jing. On the critical issues of land-ocean interactions in coastal zones[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(24): 1956－1966.

[9] Heuvel T, Hillen R H. Coastline management with GIS in the Netherlands[J]. Advance in Remote Sensing, 1995, 4(1): 27－34.

[10] 狄乾斌, 韩增林. 大连市围填海活动的影响及对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(10): 122－126.
Di Qianbin, Han Zenglin. The impacts of reclamation activities in Dalian and the countermeasures[J]. Ocean Development and Management, 2008, 25(10): 122－126.

[11] 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.

[12] 吴桑云，王文海，丰爱平，等. 我国海湾开发活动及其环境效应[M]. 北京：海洋出版社，2011.
Wu Sangyun, Wang Wenhai, Feng Aiping, et al. The Development Activities in Chinese Embayment and its Environmental Effects[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.

[13] 潘建纲. 国内外围填海造地的态势及对海南的启示[J]. 新东方，2008(10)：32－36.
Pan Jian'gang. The current situation of land reclamation and enlightenment to Hainan[J]. The New Orient, 2008(10): 32－36.

[14] Mai S, Bartholomä A. The missing mud flats of the Wadden Sea: a reconstruction of sediments and accommodation space lost in the wake of land reclamation[J]. Proceedings in Marine Science, 2000, 2: 257－272.

[15] Lee H J, Ryu S O. Changes in topography and surface sediments by the Saemangeum dyke in an estuarine complex, west coast of Korea[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(9): 1177－1189.

[16] Choi B H, Kim K O, Lee H S, et al. Perturbation of regional ocean tides due to coastal dikes[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(6): 553－563.

[17] Park Y G, Kim H Y, Hwang J H, et al. Dynamics of dike effects on tidal circulation around Saemangeum, Korea[J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 102: 572－582.

[18] Song Dehai, Wang Xiaohua, Zhu Xueming, et al. Modeling studies of the far-field effects of tidal flat reclamation on tidal dynamics in the East China Seas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 133: 147－160.

[19] Suh S W, Lee H Y, Kim H J. Spatio-temporal variability of tidal asymmetry due to multiple coastal constructions along the west coast of Korea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 336－346.

[20] Lin Lei, Liu Zhe, Xie Lian, et al. Dynamics governing the response of tidal current along the mouth of Jiaozhou Bay to land reclamation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(4): 2958－2972.

[21] Yanagi T, Onishi K. Change of tide, tidal current, and sediment due to reclamation in Tokyo Bay[J]. Oceanography in Japan, 1999, 8(6): 411－415.

[22] Manda A, Matsuoka K. Changes in tidal currents in the ariake sound due to reclamation[J]. Estuaries and Coasts, 2006, 29(4): 645－652.

[23] 鲍献文，乔璐璐，于华明，等. 福建省海湾围填海规划水动力影响评价[M]. 北京：科学出版社，2008.
Bao Xianwen, Qiao Lulu, Yu Huaming, et al. Evaluation on the Impact of Bay Land Reclamations in Fujian Province on Hydrodynamics[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.

[24] 曾相明，管卫兵，潘冲. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应[J]. 海洋学研究，2011，29(1)：73－83.
Zeng Xiangming, Guan Weibing, Pan Chong. Cumulative influence of long term reclamation on hydrodynamics in the Xiangshan′gang Bay[J]. Journal of Marine Science, 2011, 29(1): 73－83.

[25] Xie Dongfeng, Wang Zhengbing, Gao Shu, et al. Modeling the tidal channel morphodynamics in a macro-tidal embayment, Hangzhou Bay, China [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(15): 1757－1767.

[26] 刘明，席小慧，雷利元，等. 锦州湾围填海工程对海湾水交换能力的影响[J]. 大连海洋大学学报，2013，28(1)：111－114.
Liu Ming, Xi Xiaohui, Lei Liyuan, et al. The effects of coastal reclamation on hydrodynamics in Jinzhou Bay[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(1): 110－114.

[27] 索安宁，张明慧，于永海，等. 曹妃甸围填海工程的海洋生态服务功能损失估算[J]. 海洋科学，2012，36(3)：108－114.
Suo Anning, Zhang Minghui, Yu Yonghai, et al. Loss appraisal on the value of marine ecosystem services of the sea reclamation project for Caofeidian[J]. Marine Sciences, 2012, 36(3): 108－114.

[28] Okada T, Nakayama K, Takao T, et al. Influence of freshwater input and bay reclamation on long-term changes in seawater residence times in Tokyo bay, Japan[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(17): 2694－2702.

[29] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. Science, 2000, 287(5459): 1770－1774.

[30] Goss-Custard J D, Yates M G. Towards predicting the effect of salt-marsh reclamation on feeding bird numbers on the wash[J]. Journal of Applied Ecology, 1992, 29(2): 330－340.

[31] Yang Hongyan, Chen Bing, Barter M, et al. Impacts of tidal land reclamation in Bohai Bay, China: ongoing losses of critical Yellow Sea waterbird staging and wintering sites[J]. Bird Conservation International, 2011, 21(3): 241－259.

[32] 陈才俊. 围垦对潮滩动物资源环境的影响[J]. 海洋科学，1990，14(6)：48－50.
Chen Caijun. The impact of land reclamations on tidal flat animal resource and environment[J]. Marine Sciences, 1990, 14(6): 48－50.

[33] Lee Y K, Park W, Choi J K, et al. Halophyte die-off in response to anthropogenic impacts on tidal flats[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 347－354.

[34] Sato S, Kanazawa T. Faunal change of bivalves in Ariake Sea after the construction of the dike for reclamation in Isahaya Bay, Western Kyushu, Japan[J]. Fossils (Tokyo), 2004, 76: 90－99.

[35] 唐启升. 中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境[M]. 北京：科学出版社，2006.
Tang Qisheng. Marine Biological Resources and Habitats of China's Exclusive Economic Zone[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[36] Yan Huakun, Wang Nuo, Yu Tiaolan, et al. Comparing effects of land reclamation techniques on water pollution and fishery loss for a large-scale

offshore airport island in Jinzhou Bay, Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 71(1/2): 29－40.

[37] Kneib R T. The role of tidal marshes in the ecology of estuarine nekton[J]. Oceanography and Marine Biology, 1997, 35: 163－220.

[38] Levin L A, Boesch D F, Covich A, et al. The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity[J]. Ecosystems, 2001, 4(5): 430－451.

[39] 侯立军，刘敏，许世远，等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义[J]. 海洋环境科学，2001，20(2)：7－12.
Hou Lijun, Liu Min, Xu Shiyuan, et al. Species of phosphorus in core sediments from the Changjiang Estuary and its environmental significance [J]. Marine Environmental Science, 2001, 20(2): 7－12.

[40] 高效江，张念礼，陈振楼，等. 上海滨岸潮滩水沉积物中无机氮的季节性变化[J]. 地理学报，2002，57(4)：407－412.
Gao Xiaojiang, Zhang Nianli, Chen Zhenlou, et al. Seasonal variation of inorganic nitrogen in water and sediment of intertidal flats on the Shanghai coast[J]. Acta Geography Sinica, 2002, 57(4): 407－412.

[41] Lie H J, Cho C H, Lee S, et al. Changes in marine environment by a large coastal development of the Saemangeum reclamation project in Korea [J]. Ocean and Polar Research, 2008, 30(4): 475－484.

[42] Li Jia, Yao Yanming, Li Xiaoyan, et al. Numerical analysis on water exchange and its response to the coastal engineering in the Yueqing Bay in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 27(Z1): 60－73.

[43] 陈满荣，韩晓非，刘水芹. 上海市围海造地效应分析与海岸带可持续发展[J]. 中国软科学，2000(12)：115－120.
Chen Manrong, Han Xiaofei, Liu Shuiqin. The effects of reclamation and sustainable development on coastal zone in Shanghai[J]. China Soft Science, 2000(12): 115－120.

[44] Binelli A, Provini A. The PCB pollution of Lake Iseo (N. Italy) and the role of biomagnification in the pelagic food web[J]. Chemosphere, 2003, 53(2): 143－151.

[45] Ma M, Feng Z, Guan C, et al. DDT, PAH and PCB in sediments from the intertidal zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(2): 132－136.

[46] 沈钢，张祖麟，余刚，等. 夏季海河与渤海湾中壬基酚和辛基酚污染的状况[J]. 中国环境科学，2005，25(6)：733－736.
Shen Gang, Zhang Zulin, Yu Gang, et al. The pollution state of nonylphenol and octylphenol in Haihe River and Bohai Bay in summer[J]. China Environmental Science, 2005, 25(6): 733－736.

[47] UNDP/GEF. The Yellow Sea: analysis of environmental status and trends, volume 2, part Ⅱ: national reports-China[R]. Ansan, Republic of Korea: UNDP/GEF Yellow Sea Project, 2007: 304.

[48] Shi Jinghao, Li Guangxue, Wang Ping. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(1): 57－72.

[49] 乔贯宇，高大鲁，华锋，等. 实测数据和数值模拟相结合的办法计算海湾纳潮量[J]. 港工技术，2009，46(4)：1－5.
Qiao Guanyu, Gao Dalu, Hua Feng, et al. Calculating storage capacity of tidal water of bay by combining observing data with numerical model [J]. Port Engineering Technology, 2009, 46(4): 1－5.

[50] Gao Guandong, Wang Xiaohua, Bao Xianwen. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 285－294.

[51] 王学昌，孙长青，孙英兰，等. 填海造地对胶州湾水动力环境影响的数值研究[J]. 海洋环境科学，2000，19(3)：55－59.
Wang Xuechang, Sun Changqing, Sun Yinglan, et al. Study on impact of Jiaozhou Bay sea-filling on hydrodynamic environment[J]. Marine Environmental Science, 2000, 19(3): 55－59.

[52] Lou Angang, Hu Yuebo, Kuang Liang, et al. Analysis and prediction of influence imposed on Jiaozhou Bay tidal currents and tidal energy of M_2 tidal system by Jiaozhou Bay reclamation[J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 8(1): 23－29.

[53] Li Pin, Li Guangxue, Qiao Lulu, et al. Modeling the tidal dynamic changes induced by the bridge in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Continental Shelf Research, 2014, 84: 43－53.

[54] 牟森. 胶州湾岸线变化对动力环境的影响[D]. 青岛：中国海洋大学，2009.
Mu Sen. The effects of shoreline change on the hydrodynamic environment of the Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[55] 贾怡然. 填海造地对胶州湾环境容量的影响研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2006.
Jia Yiyan. Study on the impacts of reclamation on marine environmental capacity of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.

[56] 吴玉霖，孙松，张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼，2005，36(6)：487－498.
Wu Yulin, Sun Song, Zhang Yongshan. Long-term change of environment and it's influence on phytoplankton community structure in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(6): 487－498.

[57] 印萍，路应贤. 胶州湾的环境演变及可持续利用[J]. 海岸工程，2000，19(3)：14－22.
Yin Ping, Lu Yingxian. Environmental evolution and sustainable utilization of Jiaozhou Bay[J]. Coastal Engineering, 2000, 19(3): 14－22.

[58] 胡小颖，雷宁，赵晓龙，等. 胶州湾围填海的海洋生态系统服务功能价值损失的估算[J]. 海洋开发与管理，2013，30(6)：84－87.
Hu Xiaoying, Lei Ning, Zhao Xiaolong, et al. Evaluating the value loss of marine ecosystem serving function induced by land reclamation in Jiaozhou bay[J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(6): 84－87.

[59] 李京梅，王晓玲. 基于生境等价分析法的胶州湾湿地围垦生态损害评估[J]. 资源科学，2013，35(1)：59－65.
Li Jingmei, Wang Xiaoling. Wetland reclamation and habitat damage assessment in Jiaozhou Bay[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 59－65.

[60] 李善为. 从海湾沉积物特征看胶州湾的形成演变[J]. 海洋学报，1983，5(3)：328－339.
Li Shanwei. Analysis of the formation and evolution of Jiaozhou Bay based on the characteristic of sediment[J]. Haiyang Xuebao，1983，5(3)：328－339.

[61] 刘学先，李秀亭. 胶州湾寿命初探[J]. 海岸工程，1986，5(3)：25－30.
Liu Xuexian，Li Xiuting. Discussion about the lifetime of Jiaozhou Bay[J]. Coastal Engineering，1986，5(3)：25－30.

[62] 郑全安，吴隆业，张欣梅，等. 胶州湾遥感研究—Ⅰ. 总水域面积和总岸线长度量算[J]. 海洋与湖沼，1991，22(3)：193－199.
Zheng Quan'an，Wu Longye，Zhang Xinmei，et al. A remote sensing study of Jiaozhou Bay－Ⅰ. Measurement of total area and coastal line[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，1991，22(3)：193－199.

[63] 赵全基，刘福寿. 胶州湾水体缩小是主要环境问题[J]. 海岸工程，1993，12(1)：63－67.
Zhao Quanji，Liu Fushou. The reduction of water volume is the major environmental problem in Jiaozhou Bay[J]. Coastal Engineering，1993，12(1)：63－67.

[64] 汪亚平. 胶州湾及邻近海区沉积动力学[D]. 青岛：中国科学院海洋研究所，2000.
Wang Yaping. Sediment dynamics of Jiaozhou bay and adjoining areas[D]. Qingdao：Institute of Oceanography，China Academy of Sciences，2000.

[65] 边淑华，胡泽建，丰爱平，等. 近 130 年胶州湾自然形态和冲淤演变探讨[J]. 黄渤海海洋，2001，19(3)：46－53.
Bian Shuhua，Hu Zejian，Feng Aiping，et al. An exploration on the natural morphology and the siltation and erosion development of the Jiaozhou Bay in recent 130 years[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas，2001，19(3)：46－53.

[66] 杨世伦，陈启明，朱骏，等. 半封闭海湾潮间带部分围垦后纳潮量计算的商榷——以胶州湾为例[J]. 海洋科学，2003，27(8)：43－47.
Yang Shilun，Chen Qiming，Zhu Jun，et al. Computation of storage capacity for tidal water of semi-closed bays where the intertidal zone is partly embanked—taking Jiaozhou Bay as an example[J]. Marine Sciences，2003，27(8)：43－47.

[67] 陈金瑞，陈学恩. 近 70 年胶州湾水动力变化的数值模拟研究[J]. 海洋学报，2012，34(6)：30－41.
Chen Jinrui，Chen Xue'en. Numerical simulation of the hydrodynamic evolution of the Jiaozhou Bay in the last 70 years[J]. Haiyang Xuebao，2012，34(6)：30－41.

[68] 史经昊. 胶州湾演变对人类活动的响应[D]. 青岛：中国海洋大学，2010.
Shi Jinghao. Anthropogenic influences on the evolution of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao：Ocean University of China，2010.

[69] Gilliland P M，Laffoley D. Key elements and steps in the process of developing ecosystem-based marine spatial planning[J]. Marine Policy，2008，32(5)：787－796.

[70] Simonit S，Perrings C. Sustainability and the value of the "regulating" services：wetlands and water quality in Lake Victoria[J]. Ecological Economics，2011，70(6)：1189－1199.

[71] Ambrose R F. Mitigating the effects of a coastal power plant on a kelp forest community：Rationale and requirements for an artificial reef[J]. Bulletin of Marine Science，1994，55(2/3)：694－708.

[72] 胡俊. 退田还湖对鄱阳湖区农民收入的影响研究[J]. 江西农业大学学报：社会科学版，2006，5(2)：48－50.
Hu Jun. Effect of returning cropland to lake on farmers' income[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University，2006，5(2)：48－50.

[73] 褚忠信. 三峡水库一期蓄水对长江泥沙的影响[D]. 青岛：中国海洋大学，2006.
Chu Zhongxin. Effects of the Three Gorges Reservoir (TGR) phase-1 water storage on the Yangtze River sediment[D]. Qingdao：Ocean University of China，2006.

[74] 孙丽，刘洪滨，杨义菊，等. 中外围填海管理的比较研究[J]. 中国海洋大学学报：社会科学版，2010(5)：40－46.
Sun Li，Liu Hongbin，Yang Yiju，et al. Comparative studies：coastal reclamation management between China and abroad[J]. Journal of Ocean University of China：Social Science Edition，2010(5)：40－46.

[75] 胡斯亮. 围填海造地及其管理制度研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2011.
Hu Siliang. A study on land reclamation and its management systems[D]. Qingdao：Ocean University of China，2011.

[76] Wunder S. Payments for Environmental Services：Some Nuts and Bolts[M]. Indonesia：CIFOR Occasional Paper，2005.

[77] 陈尚，李京梅，任大川，等. 福建东山湾罗源湾生态资本及其对地区经济增长的贡献[M]. 北京：科学出版社，2014.
Chen Shang，Li Jingmei，Ren Dachuan，et al. Ecological Capital of Fujian Coastal Waters and its Contribution to Coastal Economy：Dongshan and Luoyuan Bays[M]. Beijing：Science Press，2014.

Impact of land reclamation on marine hydrodynamic and ecological environment

Lin Lei[1], Liu Dongyan[2], Liu Zhe[1], Gao Huiwang[1]

(1. *Key Laboratory of Marine Ecosystem and Environment*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*; 2. *Key Laboratory of Coastal Environmental Process and Ecological Remediation*, *Yantai Institute of Coastal Zone Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yantai* 264003, *China*)

Abstract: Over the last decade, land reclamation with a large scale and fast speed has developed along the Chinese coastline. Land reclamations can earn profits for local economy but also produce significantly negative influences on marine ecosystems. We summarized the impact and mechanism of land reclamation on the marine environment and ecosystem in terms of hydrodynamics, biodiversity, and biogeochemical process. By means of changing its natural geometry (shoreline, geomorphology, and water area), land reclamation impacts ocean hydrodynamic environment (tidal regime and capacity of water exchange) and weakened the environmental capacity of bays. Large scale land reclamation can damage coastal habitat, significantly reduce the biodiversity, and threaten ecosystem structure and function. Meanwhile, the changed hydrodynamics and reduced biodiversity can influence the process of biogeochemical cycle, which will accelerate eutrophication and increase the risk of ecological disaster. The ecological remediation is very critical for reducing the negative impact from land reclamation. Three ecological methods are suggested to do remediation after land reclamation, which include increasing the biomass, establishing natural reserve, and returning the land back to sea. Based on the linear relationship between the ecosystem services and the ecological habitat area, the strategy and policy of ecological compensation are applied for quantifying its economic value. Internationally, based on the above linear relationship, quantitative parameters of ecosystem service and functioning have gradually applied into environmental management. With some nonlinear theories developed, the method of ecological compensation has been more and more reasonable. In China, the quantitative research on the environmental and ecological effect of land reclamation and the practical application of scientific theory in management are still need improved. According to current research status and trend, the cross and integration of natural science and social science may be the most sensible and best way to the synthetically and accurately evaluate the impact of land reclamation on marine environment and ecosystem.

Key words: land reclamation; water exchange; environmental capacity; ecosystem service; ecological remediation