

基于数值模拟的海湾环境容量价值损失的预测评估

——以厦门同安湾围填海为例

王 萱,陈伟琪*,江毓武,张珞平 (厦门大学环境科学研究中心,福建 厦门 361005)

摘要: 基于海湾环境容量价值影响因素的分析,采用环境经济学的影子工程法,结合水动力数值模型及其与污染物扩散的耦合模型,建立了围填海导致的海湾环境容量价值损失的预测评估模型和方法,并以厦门同安湾为例,对同安湾 4 个围填海规划方案可能造成的环境容量价值的损失进行了预测评估.结果表明,方案 1~方案 4 围填海面积依次为 1.98,7.73,9.38,19.24km²,围填海造成的环境容量的损失依次为 12281.3,48418.6,60706.6,132800.1 万元/a,单位面积的损失依次为 62.03,62.64,64.72,69.02 元/(m²·a).围填海活动带来的环境成本不容忽视.基于评估结果,针对厦门围填海的现状提出了相关的政策建议.

关键词: 数值模拟; 海湾环境容量; 价值损失; 预测评估; 围填海; 厦门同安湾

中图分类号: X26 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2010)03-0420-06

Evaluation of losses in bay environmental capacity based on numerical simulation—a case study of sea reclamation in Tong'an Bay, Xiamen. WANG Xuan, CHEN Wei-qi*, JIANG Yu-wu, ZHANG Luo-ping (Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China). *China Environmental Science*, 2010,30(3): 420~425

Abstract: Based on an analysis of factors affecting the value of bay environmental capacity, a model evaluating the lost value of bay environmental capacity caused by sea reclamation was established using Shadow Project Method in environmental economics combined with hydrodynamic numerical model and hydrodynamic force-contaminant diffusion coupling model. The evaluation model was then applied to a case study of four planned sea reclamation projects in Tong'an Bay, Xiamen. The lost value of environmental capacity caused by projects 1 to 4 would be 1.23×10^8 , 4.84×10^8 , 6.07×10^8 , 1.33×10^9 Yuan/a, respectively; and the lost value per unit area would be 62.03, 62.64, 64.72, 69.02 Yuan/(m²·a), respectively. These environmental costs should be carefully examined in relevant project evaluations. Policy recommendations were presented according to the study results and current status of sea reclamation in Xiamen.

Key words: numerical simulation; bay environmental capacity; loss; evaluation; sea reclamation; Tong'an Bay, Xiamen

填海造陆是沿海地区缓解土地供求矛盾、扩大社会生存和发展空间的有效途径,具有明显的社会和经济效益.据不完全统计,到 2007 年止,我国(港、澳、台地区除外)共填海造地 540km²[1].围填海在促进沿海社会经济繁荣的同时,也带来了滨海湿地面积减少、红树林和珊瑚礁等特殊生境被毁、海湾自净能力减弱、港口航道淤积、沙滩退化、海岸侵蚀、沿海景观受损、海洋渔业资源减少、生物多样性下降等一系列生态环境的负面效应[2].

围填海工程对近海环境造成的负面影响已引起国内外学者的关注.国外学者通过化学监测[3-4]、沉积物粒径分析[4]、沉积速率分析[5]以及

其他科技手段,如遥感和 GIS[6]、数值模型[7]、生态模型[8]等探讨了围填海工程对水质、沉积环境、地形、水体净化能力、海岸侵蚀和海洋生态的影响[9-10].国内一些学者从宏观层次做了一些理论上的分析总结[11-14],一些学者通过沉积柱状样的 ²¹⁰Pb 分析研究了沉积速率和岸线的变化[15]、应用数值模型研究了水动力[16]、流场[17]、污染物浓度场和通量[18]、潮间带面积的变化[19];郭伟等[2]则通过较长时段的回顾性评价对深圳围海造地对海洋环境的影响作了较全面的分析.

收稿日期: 2009-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771098)

* 责任作者, 教授, wqchen@xmu.edu.cn

然而,关于围填海导致的海洋环境损害的货币化评估研究尚为罕见^[20],基于数值模拟的海湾环境容量价值损失的预测评估则未见报道。

本研究采用数值模拟和环境经济价值评估相结合的方法,对厦门同安湾围填海规划方案可能导致的海湾环境容量损失进行预测估算,以期作为规划方案的筛选和管理决策的制定提供参考。

1 研究区概况

1.1 自然概况

同安湾位于厦门岛北侧,以五通道至澳头连线为界,海湾面积 89.9km²,是构成厦门市海湾型城市框架的重要部位(图 1)。北半部为东咀港,是同安西溪的出海口,南半部称浔江海域,通过高集海堤涵洞与西海域相通,东部朝向金门,通过大、小金门水道通向台湾海峡。

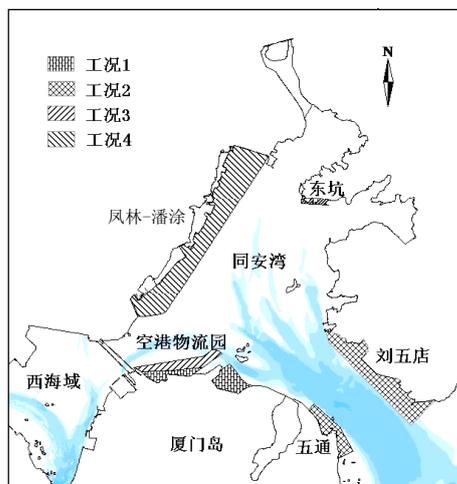


图 1 同安湾各围填海工况位置分布
Fig.1 Location of sea reclamation projects in Tong'an Bay

1.2 围填海规划方案

厦门市人多地少,土地资源匮乏,早在 20 世纪 50 年代就开始进行围填海。随着海峡西岸经济区和城市化进程的加速,从发展趋势看,同安湾今后仍有填海造地需求。

根据同安湾实际的用海需求和相关规划,确定了同安湾将陆续实施的 4 个围填海工况(图 1)。

基于这些工况的逐一累加,得到 4 个围填海规划方案(表 1)。其中,工况 1 即方案 1,在此基础上叠加工况 2 即得方案 2,以此类推。

表 1 围填海规划方案的位置分布及面积(km²)

Table 1 Location and areas of sea reclamation projects in Tong'an Bay (km²)

| 方案 | 空港物流 | 五通港区 | 刘五店 | 东坑外 | 凤林-潘涂 | 合计 |
|----|------|------|------|------|-------|-------|
| 1 | 1.98 | | | | | 1.98 |
| 2 | 1.98 | 1.32 | 4.43 | | | 7.73 |
| 3 | 3.37 | 1.32 | 4.43 | 0.26 | | 9.38 |
| 4 | 3.37 | 1.32 | 4.43 | 0.26 | 9.86 | 19.24 |

2 海湾环境容量价值损失的预测评估模型

2.1 价值损失评估模型

海湾具有自然缓冲、同化和净化污染物的能力,在特定的时间内对某种(类)污染物有一定的承受量或负荷量,即通常所说的海湾环境容量。海湾环境容量价值的大小,与自然、社会、经济以及科学技术水平等诸多因素密切相关^[21]。自然因素包含一系列自然参数,如:海湾的形状、水域体积的大小、水文参数和水动力条件以及物理、物化、化学自净能力和生物降解作用等。这些参数决定着海湾对污染物的稀释扩散能力和自净能力,从而决定海湾环境容量的大小^[22]。其中对海湾环境容量影响最大的是海湾的水容量和水体交换能力,水容量和水体交换能力越大,环境容量越大,其价值也越大。社会环境因素决定水质目标。水质目标是相对于水体满足一定的用途和功能而言的。用途不同,水质目标不同,允许存在于水体的污染物的量也不同,环境容量的大小及其价值也就不同。经济因素决定对环境改善引起的效益的评估,经济越发达,人们对环境改善效益的评估值越大,环境容量资源的价值就越大,反之,其价值就越小。科学技术因素决定污水的人工处理能力。科技水平越高,人工处理能力越大,处理成本越低,对环境容量资源的需求也越小,环境容量资源的价值就越小,反之,价值就大。

就一定时期的围填海工程而言,该时期的社

会、经济和科技条件可视为不变,则围填海导致的海湾环境容量价值的损失仅与自然因素的改变有关.围海造地减少了海湾的水容量和纳潮量,进而导致海湾环境容量变小.环境容量价值的损失可以采用影子工程法^[23]评估,用海湾水容量改变量和纳潮量改变量以及特定社会、经济和科技条件下的污染物人工处理费用的函数来表示.

因水容量改变造成的海湾环境容量价值损失的估算模型如式(1)所示,主要考虑围填海工程减少的那部分水体的自然生化降解能力.

$$D_1 = \sum M_i \cdot \Delta V \cdot C_i \times 365 \quad (1)$$

式中: D_1 为因水容量改变造成的海湾环境容量价值的损失,元/a; M_i 为单位体积水体污染物*i*的平均生化降解容量, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; ΔV 为因海湾围填海直接减少的水体体积(从低潮线算起), m^3 ; C_i 为污染物*i*的人工处理费用,元/g.

纳潮量的减小,降低了水体交换能力,削弱了污染物的稀释、迁移和扩散作用,由此造成的海湾环境容量价值损失的估算模型为:

$$D_2 = \sum (\Delta N_i \cdot V - \Delta N_i' \cdot V') \cdot C_i \times \frac{24}{t} \times 365 \quad (2)$$

式中: D_2 为因水体交换能力改变造成的海湾环境容量价值的损失,元/a; ΔN_i 为围填海前研究海湾高平潮与低平潮时污染物*i*的浓度差, mg/L ; V 为围填海前研究海湾的纳潮量, m^3 ; $\Delta N_i'$ 为围填海后研究海湾高平潮与低平潮时污染物*i*的浓度差, mg/L ; V' 为围填海后研究海湾的纳潮量, m^3 ; t 为一个潮周期的时间,h.

因此,围填海造成的海湾环境容量价值的总损失的估算模型为:

$$D = \sum M_i \cdot \Delta V \cdot C_i \times 365 + \sum (\Delta N_i \cdot V - \Delta N_i' \cdot V') \cdot C_i \times \frac{24}{t} \times 365 \quad (3)$$

式中: D 为围填海造成的海湾环境容量价值的总损失,元/a.

公式(3)中各物理量的获取途径如下: M_i 可通过实验室模拟实验获得或参考已有研究成果; C_i 和 t 可通过相关调查或资料获得; ΔV 可根据水深(从低潮线算起)和围填面积计算得到; V 和 V' 可通过水动力模型模拟得到, ΔN_i 和 $\Delta N_i'$ 可通过水

动力与污染物扩散的耦合模型模拟得到.

2.2 水文水动力数值模拟

2.2.1 数值模型 采用三维有限元并行计算模型进行流体动力学方程的离散求解,所用离散方程均为隐式结构,保证网格在很小的情况下仍能采用较长的时间步长进行计算.模型在空间上采用具有二次精度的六节点三角形单元及相应形行数组,保证模型的精度,并且充分利用有限元的特点,用灵活的三角形单元对复杂岸线进行充分拟合.为研究同安湾及其大面积滩涂区域,本模型采用了能稳定而高效地模拟浅滩干出及被淹的模拟技术.在建模过程中模型采用GIS进行处理,大大提高建模效率及模型精度,模型具体理论参见文献^[24-29],在模型应用中参考了文献^[30-31]的方法和技术.水动力模型与污染物扩散模型见公式(4)~公式(6).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \int_0^1 \frac{\partial H u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d u_i}{d t} + f \beta_{ij} u_j + g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon_j \frac{u_i}{x_j} \right) \quad (5)$$

$$\frac{d C}{d t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon_{c,j} \frac{C}{x_j} \right) + M_c + S_c \quad (6)$$

其中:

$$u_j = \{u, v, \omega\};$$

$$\omega = \frac{1}{H} \left[w + (1 - x_3) u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} - x_3 \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \right) \right];$$

$$\varepsilon_j = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, H^{-2}];$$

$$x_i = [x, y, (z+h)H^{-1}];$$

$$H = h + \zeta;$$

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$i=1,2; j=1,2,3$$

式中: t 为时间; h 为海底深度; ζ 为水位; f 为科氏力系数; x_1, x_2, x_3 为空间坐标; u, v, ω 为 σ 坐标下 x, y, z 方向的流速; w 为 z 坐标下的垂向流速; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为海水涡动黏性系数, C 为污染物浓度; M 为污染物由污染物降解所引起的耗散项,不同污染物取不同的计算值.

2.2.2 模型网络 本模型给出了六节点三角

形模型网格,对模型网格进行局部细化以反映精细岸界及其变化,在污染物计算时在主要排污口进行网格加密,使排污口区网格距达到 20m,垂向采用 σ 分层,共 10 层.最小的六节点三角形单元面积为 716m^2 ,相当于有限差分网格距 13m.因模型需要大量的有限元数值计算,采用具有 40 个 64 位 CPU 的并行计算机作为数值模拟的工作平台,运行程序也作了并行化处理,以提高计算效率.

2.2.3 边界条件 固边界(岸边界)在现状模拟中采用了不滑动边界条件($u_n=0$).

在大、中、小潮模型实验时,从 2005 年 9 月 20~28 日选取有代表性的实测潮位作为边界控制条件.同安湾顶西溪的入海流量为 $3.7 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$.

在污染物扩散模拟时,以 2005 年 9 月 17 日~10 月 17 日的实测潮型作为模拟时间,开边界污染物浓度及初始值取湾口现场观测的最小值,湾内的径流污染源强取近年观测值.

2.2.4 水动力模型验证 本模型用网格、边界条件模拟了 2005 年 10 月同安湾的大、小潮流场,并与同安湾口(靠近工况 2)的水文观测资料进行对比.结果表明,大、小潮的计算结果与实测值吻合较好,计算潮位误差最大 21 cm,潮流平均误差约为潮流振幅的 22%,涨、落急时流向误差不超过 20° .

3 结果与讨论

3.1 数值模型模拟结果

水动力模型采用现状陆域边界(由 2005 年 1 月 SPOT 卫星资料反演得到)、最新的海底地形(水深以 2003 年实测的 1:5000 海图水深数字化得到),模拟了 2005 年 10 月同安湾的潮流场(其中大潮为 2005 年 10 月 20 日 11:00 至 21 日 13:00;小潮为 2005 年 10 月 28 日 12:00 至 29 日 15:00),并与实测值进行比较,验证模型的准确性.再以同安湾不同围填海方案为模拟条件,模拟大、中、小潮期间各个方案的水动力及污染物扩散变化情况.结果列于表 2 和表 3.

表 2 各方案下同安湾一个潮周纳潮量变化

Table 2 Changes in tidal prism in Tong'an Bay under each sea reclamation project

| 方案 | 大潮 | | | | 中潮 | | | | 小潮 | | | |
|----|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | 涨潮 | | 落潮 | | 涨潮 | | 落潮 | | 涨潮 | | 落潮 | |
| | 纳潮量 ($\times 10^6 \text{m}^3$) | 增量 (%) |
| 现状 | 417.0 | | 408.3 | | 328.8 | | 338.8 | | 246.5 | | 212.5 | |
| 1 | 410.4 | -1.6 | 401.7 | -1.6 | 323.6 | -1.6 | 333.2 | -1.7 | 242.1 | -1.8 | 209.0 | -0.2 |
| 2 | 392.5 | -5.9 | 384.1 | -5.9 | 309.1 | -6.0 | 318.2 | -6.1 | 230.9 | -6.3 | 199.2 | -0.6 |
| 3 | 385.7 | -7.5 | 377.3 | -7.6 | 303.7 | -7.6 | 312.6 | -7.7 | 226.8 | -8.0 | 195.6 | -0.8 |
| 4 | 348.8 | -16.3 | 340.7 | -16.6 | 274.7 | -16.5 | 282.9 | -16.5 | 203.9 | -17.3 | 176.4 | -1.6 |

表 3 各方案下同安湾高、低平潮污染物浓度差(mg/L)
Table 3 Differentials of pollutant concentrations between high tide and low tide in Tong'an Bay under each sea reclamation project (mg/L)

| 方案 | COD | TN | TP |
|----|--------|--------|--------|
| 现状 | 0.2226 | 0.2052 | 0.0251 |
| 1 | 0.2225 | 0.2050 | 0.0250 |
| 2 | 0.2226 | 0.2022 | 0.0249 |
| 3 | 0.2228 | 0.2016 | 0.0245 |
| 4 | 0.2201 | 0.1935 | 0.0244 |

同安湾现状纳潮量为 $333.8 \times 10^6 \text{m}^3$ (取中潮

时涨、落潮纳潮量的平均值),各围填海方案导致的纳潮量的变化分别为:-1.65%,-6.05%,-7.65%,-16.5%.根据模拟的各围填海方案下涨潮和落潮时 COD、TN、TP 浓度,可计算得到高平潮与低平潮时污染物浓度差(表 3).随着填海面积的增加,高平潮和低平潮时的 TN、TP 浓度差值逐渐减少,潮流对污染物的扩散降解能力逐渐降低.

3.2 环境容量价值损失的预测评估结果

要计算环境容量价值的损失,必须先确定 C_i .一般污水经二级处理可同时去除绝大部分的

COD、悬浮物以及部分氮、磷等,满足排放标准.为避免重复计算,本研究依据二级污水处理费用,估算单位质量污染物的平均去除费用(表4),以此作为各污染物的 C_i .

基于表 1~表 4 中的数据,根据公式(1)~(3)(同安湾为正规半日潮港,式中 t 取 12h),可估算各围填海方案导致的海湾环境容量价值的损失,以

及单位面积围填海造成的海湾环境容量价值的损失,估算结果见表 5.

由表 5 可见,同安湾 4 个围填海规划方案实施后导致环境容量价值的损失为 12281.3~132800.1 万元/a,单位面积的损失分别为 62.03, 62.64, 64.72, 69.02 元/($m^2 \cdot a$).围填海将带来的同安湾环境容量价值损失较大,且具有累积效应.

表 4 污染物的平均去除费用
Table 4 Average costs of waste treatment

| 污染物 | 进水浓度*(mg/L) | 出水浓度*(mg/L) | 去除量(mg/L) | 二级污水处理费用**(元/t) | 去除费用(10^2 元/g) | 平均去除费用 C_i (10^2 元/g) |
|-----|-------------|-------------|-----------|-----------------|-------------------|----------------------------|
| SS | 200 | 20 | 180 | | 0.44 | |
| COD | 800 | 153 | 647 | | 0.12 | |
| TN | 30.10 | 8.76 | 21.34 | 0.8 | 3.75 | 5.76 |
| TP | 4.83 | 0.56 | 4.27 | | 18.74 | |

注:*为厦门市4个二级污水处理厂进、出水污染物浓度监测结果的平均值;**为国家制定的污水二级处理成本标准^[32]

表 5 各围填海方案导致的海湾环境容量价值损失
Table 5 Lost values of environmental capacity caused by each sea reclamation project

| 方案 | S (km^2) | M_i^* [$g/(m^3 \cdot d)$] | ΔV ($\times 10^6 m^3$) | $\Sigma(\Delta N_i V_i - \Delta N_i' V_i')$ ($\times 10^6 g$) | D_1 ($\times 10^4$ 元/a) | D_2 ($\times 10^4$ 元/a) | D ($\times 10^4$ 元/a) | P [元/($m^2 \cdot a$)] |
|----|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | 1.98 | | 3.96 | 2.624 | 1248.8 | 11032.5 | 12281.3 | 62.03 |
| 2 | 7.73 | 0.15 | 18.28 | 10.144 | 5764.8 | 42653.9 | 48418.6 | 62.64 |
| 3 | 9.38 | | 21.44 | 12.829 | 6761.3 | 53945.3 | 60706.6 | 64.72 |
| 4 | 19.24 | | 33.97 | 29.035 | 10712.8 | 122087.3 | 132800.1 | 69.02 |

注: S 为各围填海规划方案的面积;*取自文献^[33]

3.3 讨论

各围填海规划方案将带来环境容量的价值损失达数亿元/a 至数十亿元/a,如果把围填海工程对海湾生物资源、海域气候调节功能、滨海景观资源造成的损失也考虑在内,围填海带来的环境成本将更大.显然,围填海活动在投入直接工程成本的同时,也伴随着显著的外部费用即环境损失.海湾环境容量属于可再生资源,若合理利用,可永续服务于人类.而围填海是一种永久性占用海域的行为,对海域环境容量造成的损失,往往是无法挽回或逆转的.因而,在进行围填海规划时,应通过战略环境影响评价,对可能带来的负面影响及导致的损失进行预测评估,谨慎地决策.

同安湾各围填海规划方案单位围填海面积造成的环境容量价值损失最大达 69.02 元/($m^2 \cdot a$),从长远(100 年)来看,若考虑代际公平,采用零贴

现,则围填海导致的环境容量价值损失最高达 6902 元/ m^2 .但目前同安湾填海造地海域使用金征收标准为 7.5~22.5 元/ m^2 ^[34],明显偏低,并未全面反映填海造地带来的外部费用,无法起到抑制盲目填海造地、保护海洋生态环境的作用.因此,建议有关部门科学合理地制定填海造地海域使用金征收标准,使之成为调控围填海需求、保障海岸带可持续发展的有效经济手段.

4 结语

采用数值模拟和环境经济评价相结合的方法,对厦门同安湾的围填海规划方案可能导致的海湾环境容量损失进行预测估算.结果显示,单位围填海面积造成的环境容量价值的损失为 62.03~69.02 元/($m^2 \cdot a$)不等,远高于同安湾填海造地的海域使用金征收标准.

参考文献:

- [1] 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, 2008,13(10):32-36.
- [2] 郭伟, 朱大奎. 深圳围海造地对海洋环境影响的分析 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2005,41(3):286-296.
- [3] Hodoki Y, Murakami T. Effects of tidal flat reclamation on sediment quality and hypoxia in Isahaya Bay [J]. Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Cosystems, 2006,16(6):555-567.
- [4] Amano A, Iwamoto N, Inoue T, et al. Seafloor environmental changes resulting from nineteenth century reclamation in Mishou Bay, Bungo Channel, southwest Japan [J]. Environmental Geology, 2006,50(7):989-999.
- [5] Kapsimalis V, Poulos S E, Karageorgis A P, et al. Recent evolution of a Mediterranean deltaic coastal zone: human impacts on the Inner Thermaikos Gulf, NW Aegean Sea [J]. Journal of the Geological Society, 2005,162:897-908.
- [6] Siddiqui M N, Maajid S. Monitoring of geomorphological changes for planning reclamation work in coastal area of Karachi Pakistan [J]. Advances in Space Research, 2004,33(7):1200-1205.
- [7] Mani J S. A numerical study on coastal defence at Chennai and related management strategies [J]. Natural Hazards, 2004,31(2):523-536.
- [8] Hata K, Nakata K, Suzuki T. The nitrogen cycle in tidal flats and eelgrass beds of Ise Bay [J]. Journal of Marine Systems, 2004, 45(3):237-253.
- [9] Ellison A M, Farnsworth E J. Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems: Past impacts, present trends, and future predictions [J]. Biotropica., 1996,28(4):549-565.
- [10] Sato S, Azuma M. Ecological and paleoecological implications of the rapid increase and decrease of an introduced bivalve *Potamocorbula* sp. after the construction of a reclamation dike in Isahaya Bay, western Kyushu, Japan [J]. Palaeogeography Palaeo-Climatology Palaeoecology, 2002,185(3):369-378.
- [11] 刘育, 龚凤梅, 夏北成. 关注填海造陆的生态危害 [J]. 环境科学动态, 2003,(4):25-27.
- [12] 吴耀泉. 胶州湾沿岸带开发对生物资源的影响 [J]. 海洋环境科学, 1999,18(2):38-42.
- [13] 罗章仁. 香港填海造地及其影响分析 [J]. 地理学报, 1997, 52(3):220-227.
- [14] 余兴光, 郑森林, 卢昌义. 厦门海湾生态系统退化的影响因素及生态修复意义 [J]. 生态学杂志, 2006,25(8):974-977.
- [15] 潘少明, 施晓冬, 王建业, 等. 围海造地工程对香港维多利亚港现代沉积作用的影响 [J]. 沉积学报, 2000,18(1):22-28.
- [16] 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.
- [17] 赵东波. 罗源湾港口工程填海前后流场变化分析 [J]. 海洋地质动态, 2006,22(9):11-17.
- [18] 孙长青, 王学昌, 孙英兰, 等. 填海造地对胶州湾污染物输运影响的数值研究 [J]. 海洋科学, 2002,26(10):47-50.
- [19] 倪晋仁, 秦华鹏. 填海工程对潮间带湿地生境损失的影响评估 [J]. 环境科学学报, 2003,23(3):345-349.
- [20] 彭本荣, 洪华生, 陈伟琪, 等. 填海造地生态损害评估: 理论、方法及应用研究 [J]. 自然资源学报, 2005,20(5):714-726.
- [21] 陈伟琪, 张珞平, 洪华生, 等. 近岸海域环境容量的价值及其价值量评估初探 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999,38(6):896-901.
- [22] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [23] 王金南. 环境经济学: 理论、方法、政策 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994:284-306.
- [24] Jiang Y W, Wai O. Drying-wetting approach for 3D finite element sigma coordinate model for estuaries with large tidal flats [J]. Advances in Water Resources, 2005,(28):779-792.
- [25] Jiang Y W, Wai O. A Geographical information system for marine management-its application in Xiamen Bay, China [J]. Journal of Coastal Research, 2004,(43):254-264.
- [26] Jiang Y W, Wai O. 3D parallel estuary model for cohesive sediment transport in large tidal flats Coastal Sediments'03 [C]// Fifth international symposium on coastal engineering and science of coastal sediment processes. Florida, USA: East Meets West Productions, 2003.
- [27] Chau, K W, Jiang Y W. Three-dimensional pollutant transport model for the Pearl River Estuary [J]. Water Research, 2002, 36(80):2029-2039.
- [28] Chau, K W, Jiang Y W. 3D numerical model for Pearl River estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,127(1):72-82.
- [29] 江毓武, 洪华生, 张珞平. 地理信息系统(GIS)在厦门海域水质模型中的应用 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999,38(1):90-95.
- [30] 温生辉. 厦门西海域整治和开发相关的水动力环境数值模拟 [R]. 厦门: 厦门海洋研究开发院, 2003.
- [31] 徐啸. 厦门西海域暨马鸾湾、杏林湾综合治理工程物理模型试验研究成果 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2003.
- [32] 污水处理费该涨不该涨, 如何监督污水处理成本 [Z]. <http://www.022net.com/2009/3-4/423965142461311.html>, 2009-03-04.
- [33] 林元烧, 郑雪红, 郑爱榕, 等. 厦门同安湾需氧有机物的去除和释放通量估算 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2002,41(3):340-345.
- [34] 厦门市人民政府. 厦门市海域使用金征收管理办法 [Z]. 厦门: 2006.

作者简介: 王萱(1981-), 女, 山东汶上人, 厦门大学博士研究生, 主要从事环境与资源经济学研究. 发表论文 7 篇.