厦门海湾型城市发展累积生态效应动态评价

王向华，朱晓东*，李杨帆，黄和平，蔡邦成

南京大学环境学院，污染控制与资源化研究国家重点实验室，江苏南京 210093）

摘要：港湾地区的快速城市化使港湾湿地生态系统及其生产功能和服务功能发生急剧改变并在时间和空间上产生累积效应。以具有典型意义的厦门港湾湿地为研究对象，采用系统动力学方法，定性分析系统因子因果反馈关系，筛选港湾湿地水动力环境、水质环境、生物生态环境、地形地貌、景观环境作为厦门海湾型城市发展的累积生态效应指示因子。通过调整模型的相关政策变量及组合，仿真模拟了不同发展策略下厦门港湾湿地的累积生态效应，并结合灰色评估模型对累积生态效应进行量化，得出不同发展策略的累积生态效应指数，并对模型进行了模型验证与敏感性分析。设计三大未来发展情景，即基准情景（BS）、发展规划情景（S1）、生态城市发展情景（S2）。模型模拟结果表明：基准情景下 2020 年厦门城市发展对港湾湿地的累积生态效应指数为 0.61；发展规划情景下对港湾湿地的累积生态效应指数为 0.37；生态城市发展情景下对港湾湿地的累积生态效应指数为 0.30，相对基准情景下可减少累积生态效应 50%，建议厦门市按照海湾型生态城市模式进行发展。

关键词：城市发展；港湾湿地；累积生态效应；系统动力学；厦门市

文章编号：1000-0933（2007）06-2375-07 **中图分类号**：P96，Q149，TU984 **文献标识码**：A

Dynamic assessment of the cumulative ecological effects from Xiamen Bay city development

WANG Xiang-Hua, ZHU Xiao-Dong, LI Yang-Fan, HUANG He-Ping, CAI Bang-Cheng

State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6): 2375 ~ 2381.**

Abstract: Rapid urbanization in the Xiamen Bay area has greatly changed ecosystem productivity and other eco-service function of wetland ecosystems. A simulation model was developed based on system dynamics and analytical causal-loop feedbacks to quantify the cumulative ecological effects of the change for the Xiamen Bay City, including its hydrological dynamics, water quality, ecological characteristics, geomorphic features, and landscape structure. The cumulative ecological effects of alternative policies were simulated by adjusting the decision-making variables and their combinations, and quantitatively assessed by using the grey model (GM), followed by model verification and sensitivity analysis. The consequences of three scenarios for future management were simulated and compared, including baseline scenario (BS), the eleventh Five-Year Plan scenario (S1), and the eco-city scenario (S2). The cumulative ecological effects indices were 0.61, 0.37, and 0.30, respectively, for the BS, S1, and S2 scenario. The cumulative ecological effects under S2 scenario

基金项目：国家自然科学基金资助项目（40576024）；国家海洋局 908 专项资助项目（908-02-04-08）；江苏省研究生创新计划资助项目（2005-067）；上海同济高廷耀环保科技发展基金会青年博士杰出人才基金资助项目（2006 年度）

收稿日期：2006-08-10；**修订日期**：2007-03-15

作者简介：王向华（977 ~），男，山东德州人，博士生，主要从事环境规划与管理研究. E-mail：wxhmail@sdu.edu.cn

* **通讯作者** Corresponding author, E-mail：xdzhu@nju.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of China (No. 40576024), 908 Special Program of State Oceanic Administration of China (No. 908-02-04-08), Graduate Innovation Program of Jiangsu Province of China, Shanghai Tongji Gao Tingyao Environmental Science & Technology Development Foundation

Received date: 2006-08-10; **Accepted date**: 2007-03-15

Biography: WANG Xiang-Hua, Ph D. candidate, mainly engaged in environmental management and planning program. E-mail: wxhmail@sdu.edu.cn

was 50% of the BS scenario. Consequently, we recommend Xiamen adopt the eco-city (S2) model for its future development.

Key Words: urbanization; cumulative effects; coastal wetland; system dynamics; Xiamen

港湾地区的城市化与工业化过程与陆海相互作用之间存在十分复杂的相互作用,如城市化过程中陆源污染物进入海湾后,常发生滞留现象,并在有机体和沉积物中累积[1,2];城市化过程中海岸工程建设会对海岸附近的水动力条件、泥沙运动规律和生态环境造成影响,甚至造成不可逆转的生态资源衰退[3]。在自然和人类双重因素的影响下,特别是人类活动作为主要驱动因素(如城市化)强烈干扰的条件下,港湾地区的环境和资源发生了前所未有的变化,原有的港湾湿地系统正在发生快速的深刻变化,其生态健康水平急剧下降[4~6]。这种变化在经济发展、城市化速度相对更快、人口密度更大的我国东部港湾城市地区显得尤为典型。

厦门市地处我国东南沿海福建省东南部、台湾海峡西侧、九龙江入海处,是典型基岩港湾型的海岸城市。近年来,厦门地方政府提出建设海峡西岸经济区,实现从海岛型城市向海湾型生态城市的战略目标,城市建设的重点已从岛内转向岛外海湾地区,由海岛向海湾空间拓展。在此过程中,厦门本岛四周港湾湿地圈将面临空前的环境压力,并呈放射状向四周(包括陆地与外海)不断蔓延,城市社会经济发展与港湾湿地生态环境之间的矛盾成为不可回避的现实问题。图 1 为 1973 年至 2004 年厦门城市发展对港湾湿地占用而引起的海岸线的变迁[7]。

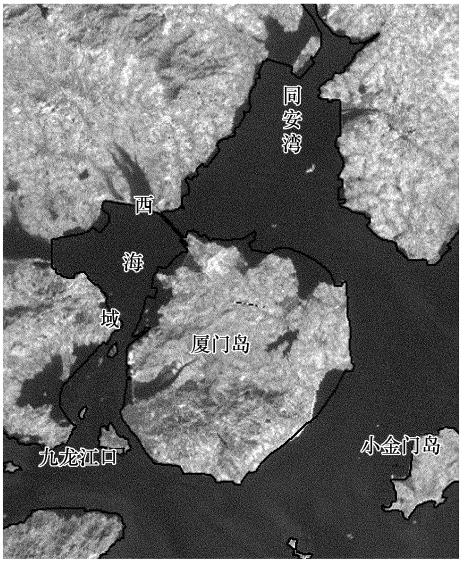

图 1 1973 年和 2004 年厦门海岸线变迁图

Fig. 1 Xiamen shoreline transformation from 1973 to 2004

本文以厦门市社会-经济-自然复合生态系统为建模对象,建立起完整的厦门市海湾型城市发展战略的系统动力学仿真模型 CWSD (City-Wetland System Dynamic Model),仿真模拟不同城市发展策略下港湾湿地的累计生态效应,考察政策调控因素的介入或变化对湿地系统响应行为的影响,在此基础上进行优化调控,提出城市发展与港湾湿地的协调发展的策略。

1 CWSD 模型建立

1.1 系统动力学

系统动力学简称 SD (System Dynamics),1956 年由美国麻省理工学院 Jay. w. Forrester 教授创始[8]。SD 模型能够反映复杂系统结构功能与动态行为之间相互作用关系,对复杂系统进行动态仿真实验,从而考察复杂系统在不同情景(不同参数或不同策略因素)下的变化行为和趋势,提供决策支持[9]。尽管目前系统动力学模型处理精度还不高,但在反映系统组分之间的复杂因果关系方面还是非常有效的,可以用来判断并解决实际的决策问题[10~12],适用于处理精度要求不高的复杂的社会经济及生态环境问题,其代表性工作是发表于 20 世纪 70 年代初的《增长的极限》[13]。目前系统动力学已经广泛应用于生态环境研究领域:如环境影响评价[14,15],环境规划与管理[16~18],环境可持续性评估[19],特别是研究社会经济发展与生态环境耦合关系的生态经济模型等[20~25]。国外在湿地生态系统与城市化响应机制研究方面侧重于内陆淡水流域湿地、城市湿地[26~28],它们缺乏象我国特有的快速城市化过程,因而特别缺少港湾湿地快速城市化的响应机制研究。本研究应用系统动力学对厦门港湾地区快速城市化与港湾湿地生态系统耦合关系进行研究。

1.2 建模过程

以厦门市社会-经济-自然复合生态系统为建模对象,在因果反馈分析的基础上将区内社会-经济-环境系

统分为人口、工业、水污染控制、港湾湿地生态系统 4 个子系统,分别绘制系统流图,在系统分析的基础上建立定量关系,把所确定的各种参数的原始数据及政策变量值带入结构方程式,进行仿真运算,得出各变量的值及相关变化表。绘制结果曲线图表,并调整数据,反复模拟实验,得 CWSD 模型。建模目的为反映厦门港湾湿地在城市发展下的状态及其响应过程,定量刻化港湾湿地生态系统与社会、经济发展之间的互动影响关系。

1.3　因果反馈分析

厦门海湾型城市发展仿真模型中,各变量之间存在正向(+)和反向(-)反馈作用,避免了单向模拟和人工干预的缺点,使仿真模拟结果更加科学客观。图 2 为厦门海湾型城市建设与港湾湿地生态系统的因果反馈关系图,可见城市发展将带来海岸工程建设、围海填海、海产养殖及排污用海指标层的变化,而这些指标又将带来港湾湿地物理(水动力条件、纳潮量等)、化学(水质下降、赤潮发生)及生物(生境破坏、生物多样性减少)层次指标的改变,最终产生累计生态效应而使得港湾湿地生产能力下降、生态功能退化。以上述不同指标层之间的因果反馈关系构建模型框架,分别绘制系统流图。

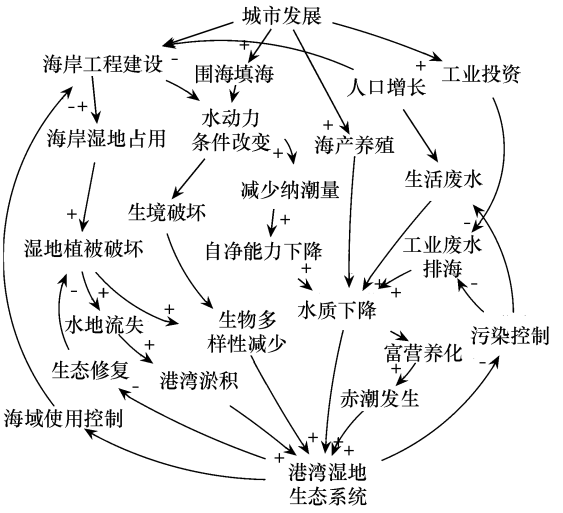

图 2　厦门城市发展与港湾湿地因果反馈关系图

Fig. 2　Causal-loop digram for City-Wetland System

City development 城市发展; Industry investment 工业投资; Sea reclamation 围海填海; Construction of coastal projects 海岸工程建设; Population increasing 人口增长; Seafood feeding 海产养殖; Occupying the coastal wetland 海岸湿地占用; Changing in hydrodynamic factors 水动力条件改变; Destroying the wetland vegetation 湿地植被破坏; Destroying the circumstance 生境破坏; The decrease in tidal influx 减少纳潮量; The descending of self purification capacity 自净能力下降; The descending of water quality 水质下降; Domestic sewage 生活废水; Industrial sewage 工业废水排海; Soil erosion 水土流失; Ecological restoration 生态修复; The decrease in biodiversity 生物多样性减少; The siltation of the bay 港湾淤积; Eutrophication 富营养化; Algal bloom 赤潮发生; Pollution control 污染控制; Sea area control 海域使用控制; Ecosystem of coastal wetland 港湾湿地生态系统

1.4　系统流图

系统动力学专用软件 VENSIM [9] 是麻省理工学院开发的在 WINDOWS 环境下运行的直观方便的图形化软件工具,该软件已广泛应用于各种微观和宏观系统,小到企业管理、产品开发、经济效益分析,中型的如行业规划、城市规划、资源开发利用,大则有国家模型和全球模型。本研究使用 VENSIM 软件建立系统流图,该模型含状态变量、速率变量、辅助变量及常量,以这些变量为基础建立系统动力学方程组。其中状态变量是系统的核心,表示系统在变化过程中某个具体时刻的状态;速率变量和辅助变量之间的定量关系比较复杂,需要对历史数据进行局部分析,并且对整个系统仿真的有效性和稳定性进行历史检验和灵敏度分析;部分常量由厦门社会经济发展统计年鉴获得,在模型中作为常量使用。根据因果关系图,以这些变量为基础建立系统动力学方程组,该模型的初始年为 2006 年,仿真终止年为 2020 年,步长为 1a。2010 年(即"十一五"规划末期)为相关参数调控的过渡点,使用 VERSIM 软件中阶跃函数 SETP 仿真相关参数的变化。

累积生态效应(Cumulative Ecological Effects, CCE)是生态效应在时间和空间尺度上的累积,目前相关的研究主要有针对环境要素和生态过程的累积环境影响或累积生态效应评价,研究案例有湿地、流域、开发区和海域,且评价指标、评价方法尚不成熟 [10~33],本文筛选港湾湿地水动力环境、水质环境、生物生态环境、地形地貌、景观环境作为本研究的累积生态效应指示因子。利用德尔菲法确定城市发展驱动对港湾湿地生态效应因子影响权重,分别为 0.3、0.1、0.2、0.2、0.1,然后根据城市发展驱动因子与海湾累积生态效应的模糊关系,分为 3 个等级,并根据其有显著影响、有一定影响、基本无影响分别赋予 1、0.5、0.1 的得分。作为参数输入港湾湿地生态系统的系统动力方程,通过调控政策变量得出港湾湿地累积生态效应指数。下面以港湾湿地生态子系统为例对模型作进一步解释,图 3 为该子系统的流程图。

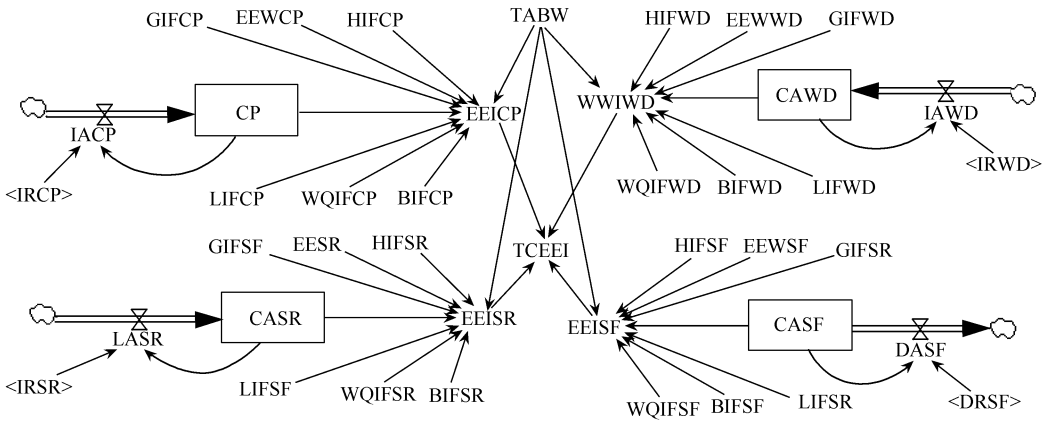

图 3 港湾湿地生态系统系统流图

Fig. 3 The flow diagram for wetland ecosystem of Xiamen City

TABW **港湾湿地总面积** Total area of bay wetland；EEWCP **海岸工程生态效益权重** Ecological effect weight of coastal projects；HIFCP **海岸工程对水动力影响因子** Hydrodynamic inpact factors of coastal projects； CP **海岸工程** coastal projects；IACP **海岸工程增加面积** Increase area of coastal projects；IRCP **海岸工程面积增加率** Increasing rate of coastal projects；EEICP **海岸工程生态效应指数** Ecological effect index of coastal projects；WQIFCP **海岸工程对水质影响因子** Water quality impact factors of coastal project；BIFCP **海岸工程对生物影响因子** biologic impact factors of coastal projects；GIFCP **海岸工程对地形地貌的影响因子** geomorphology impact factors of coastal projects；LIFCP **海岸工程对景观的影响因子** landscape impact factors of coastal projects；CAWD **排污用海** the coastal area for wastewater discharge；HIFWD **排污用海对水动力影响因子** Hydrodynamic inpact factors of wastewater discharge；EEWWD **排污用海生态效应权重** Ecological effect weight of wastewater discharge；WWIWD **排污用海生态效应指数** Ecological effect index of wastewater discharge；IAWD **排污用海增加面积** Increase area of wastewater discharge；WQIFWD **排污对水质影响因子** Water quality impact factors of wastewater discharge；BIFWD **排污对生物生境影响因子** Biologic impact factors of wastewater discharge；IRWD **排污用海面积增加率** Increasing rate of wastewater discharge；GIFWD **排污对地形地貌的影响因子** geomorphology impact factors of wastewater discharge；LIFWD **排污对景观的影响因子** landscape impact factors of wastewater discharge；CASF **海水养殖** the coastal area for seafood feeding；HIFSF **海产养殖对水动力影响因子** Hydrodynamic impact factors of masine culture；EEWSF **海产养殖生态效应权重** Ecological effect weight of masine culture；EEISF **海水养殖生态效应指数** Ecological effect index of masine culture；DASF **海产养殖减少面积** Decrease area of masine culture；DRSF **海产养殖面积减少率** Decreasing rate of seafood feeding；WQIFSF **海产养殖对水质影响因子** Water quality impact factors of seafood feeding；BIFSF **海产养殖对生物生境的影响因子** Biologic impact factors of seafood feeding；GIFSF **海产养殖对地形地貌的影响因子** geomorphology impact factors of masine culture；LIFSF **海产养殖对景观的影响因子** landscape impact factors of masine culture；CASR **围海填海** the coastal area for sea reclamation；IASR **围海填海增加面积** Increase area of sea reclamation；EESR **围海填海生态效应权重** Ecological effect weight of sea reclamation；EEISR **围海填海生态效应指数** Ecological effect index of Sea Reclamation；HIFSR **围海填海对水动力影响因子** Hydrodynamic inpact factors of Sea Reclamation；BIFSR **围海填海对生物生境影响因子** Biologic impact factors of Sea Reclamation；WQIFSR **围海填海对水质影响因子** Water quality impact factors of Sea Reclamation；GIFSR **围海填海对地形地貌的影响因子** geomorphology impact factors of of Sea Reclamation；LIFSR **围海填海对景观的影响因子** landscape impact factors of Sea Reclamation；IRSR **围海填海面积增加率** Increasing rate of sea reclamation；TCEEI **总累积生态效应** Total cumulative ecological effects index

模型中描述系统行为的状态方程组以差分方程来表示：

$$X(t) = X(t - dt) + F[X(t), p]\,dt \quad (1)$$

$$X(t_0) = X_0 \quad (2)$$

式中，$X(t)$**为状态变量在** t **时刻的值；**$F[X(t), p]$**为** t **时刻的速度变量；**dt**为模拟的时间步长. 在软件** VENSIM **中，上述状态方程组用** INTEG **(速率，初值)函数 表示，以海岸工程建设为例 (单位** m^2**)：**

厦门市海岸工程建设面积 = INTEG **(海岸工程增加面积，海岸工程面积初值)**

港湾湿地生态子系统主要方程：

$$\mathrm{TCEEI} = \mathrm{EEICP} + \mathrm{WWIWD} + \mathrm{EEISF} + \mathrm{EEISR} \quad (3)$$

$$\mathrm{EEICP} = \mathrm{EEWCP} \times (\mathrm{HIFCP} + \mathrm{WQIFCP} + \mathrm{BIFCP} + \mathrm{GIFCP} + \mathrm{LIFCP}) \times \mathrm{CP}/\mathrm{TABW} \quad (4)$$

$$\mathrm{WWIWD} = \mathrm{EEWWD} \times (\mathrm{WQIFWD} + \mathrm{BIFWD} + \mathrm{HIFWD} + \mathrm{GIFWD} + \mathrm{LIFWD}) \times \mathrm{CAWD}/\mathrm{TABW} \quad (5)$$

$$EEISF = EEWSF \times (HIFSF + GIFSR + WQIFSF + BIFSF + LIFSR) \times CASF/TABW \quad (6)$$

$$EEISR = EESR \times (BIFSR + GIFSF + HIFSR + LIFSFWQIFSR) \times CASR/TABW \quad (7)$$

2　模型验证与敏感性分析

2.1　模型验证

用 2001 ~2005 年的相关数据来验证 CWSD 模型的有效性,选择部分城市发展指标及湿地指标为验证变量,验证结果见表 1。

表 1　模型验证结果

Table 1　Verification result of simulation model

项目 Item	数据 Data	2001	2002	2003	2004	2005
人口 Population	历史数据 Hisitorical data	1328135	1357594	1394584	1442655	1499950
	仿真数据 Simulated data	1353320	1407460	1463760	1522310	1563200
	相对误差 Relative error (%)	1.89	3.67	4.96	5.52	4.21
固定资产投资 Fixed assets investment (en thousand yuan)	历史数据 Hisitorical data	1918866	2117318	2451180	3046531	4016200
	仿真数据 Simulated data	2089752	2296262	2545736	3244134	3898315
	相对误差 Relative error (%)	8.90	8.45	3.85	6.48	2.93
国内生产总值 GDP (en thousand yuan)	历史数据 Hisitorical data	5583268	6483570	7 596934	8832344	10295500
	仿真数据 Simulated data	5946180	6840166	7961587	9501836	10662020
	相对误差 Relative error (%)	6.5	5.5	4.8	7.58	3.56
湿地纳污量 Waste water discharged to the wetland (en thousand ton)	历史数据 Hisitorical data	8535	9295	12965	11138	11290
	仿真数据 Simulated data	9183	953	13694	11639	11906
	相对误差 Relative error (%)	7.6	2.54	5.63	4.5	5.46

* 引自厦门经济特区系列统计年鉴 (2002 ~2006 年) Quote from the Yearbooks of Xiamen special economic zone (2002 ~2006)

表 1 表明该模型对城市发展指标 (人口、固定资产投资、GDP 总量) 及港湾湿地指标 (湿地纳污量) 的预测误差较小,平均误差分别为 4.05%、4.95%、5.59%、5.15%,模型仿真较好,可以应用于预测。

2.2　敏感性分析

敏感性分析用于确定模型输出是否随参数的调整发生明显改变。一旦模型的稳健性得到保证,则模型可用来进行政策试验[4]。将海岸工程面积增加率参数由目前的 7% (参数 A) 调整到 6% (参数 B),则由图 4 可以看出模型参数的改变对港湾湿地生态系统的影响较为明显。

3　仿真结果与讨论

通过对反馈关系图和各个子系统进行各变量间逻辑关系与系统结构分析,建立了系统动力学方程,显示其定量关系,并调试运行。主要调控参量有海岸工程年增加率、城市生活污水集中处理率、工业废水排放达标率,排污用海面积增加率,环境保护投资指数等,得出 2006 ~ 2020 年仿真结果共分 3 个方案,仿真结果如图 5。

3.1　基础方案 (Baseline scenario,BS)

2006 年至 2020 年保持 "十五" 期间固定资产投资对港口码头建设的拉动效果,港口码头建设面积增加率为 7%、城市生活污水集中处理率、工业废水排放达标率、环境保护投资指数继续保持 "十五" 末期的 66.2%、

95.3%，2.49%，在上述发展模式下 2020 年厦门港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.61。

3.2 方案 1（Scenario 1，S1）

结合厦门市社会经济发展“十一五”规划中的相关政策，2010 年预期地区生产总值（GDP）超过 2000 亿元、“十一五”期间年均递增 15% 以上；2006 年开始控制海岸工程面积年增加率，逐步降低到 2010 年的 5%，2015 年之后逐步降低为 3%；2010 年后城市生活污水集中处理率及工业废水排放达标率提高到 80% 及 98%。在上述发展模式下 2020 年厦门港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.37。

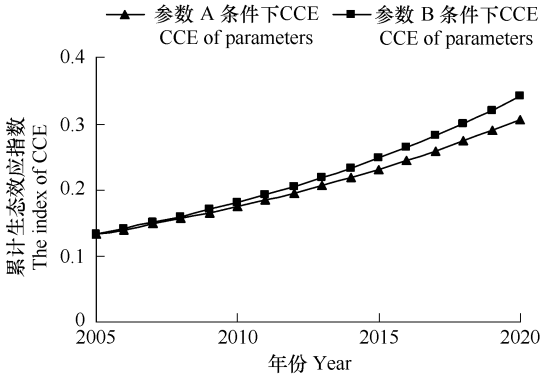

图 4 参数敏感性分析图

Fig. 4 Sensitivity analysis to the parameters

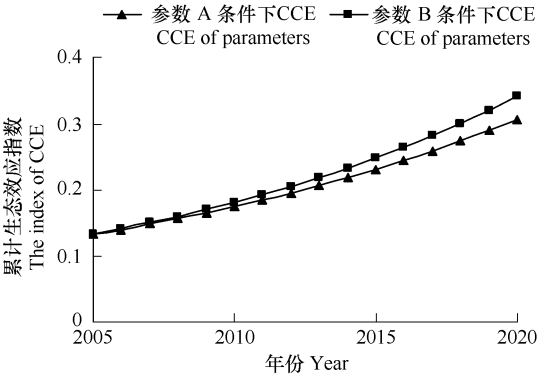

图 5 不同情景下港湾湿地的累积生态效应

Fig. 5 Cumulative ecological effects in different scenario

3.3 方案 2（Scenario 2，S2）

在厦门市社会经济发展“十一五”规划基础上融入海湾型生态城市建设理念，2010 年后城市生活污水集中处理率及工业废水排放达标率提高到 80% 及 98%，2010 提高环境保护投资指数为 5%，进行滩涂湿地红树林生态修复工程，通过滩涂红树林的种植，建设滨海湿地生态公园，达到海洋生态建设与城市建设浑然一体的目标。在上述发展模式下 2020 年厦门港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.30。

4 小结与讨论

应用系统动力学对 2006～2020 年厦门城市发展对港湾湿地生态系统累积生态效应的影响设置了 3 种情景（BS，S1，S2）进行分析，结果表明：

（1）通过调整 CWSD 模型的相关政策变量及组合，仿真模拟了不同发展策略下厦门港湾湿地的累计生态效应，并通过灰色评价模型得出不同发展策略的累计生态效应指数，系统动力学与灰色评价模型的结合能反映不同城市发展策略下港湾湿地累积生态效应的动态变化。

（2）基准情景下 2020 年厦门港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.61；结合厦门市社会经济发展“十一五”规划情景下港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.37；厦门海湾型生态城市建设的情景下港湾湿地累积生态效应相对指数为 0.30，相对基准情景下可减少累积生态效应 50%。建议厦门市合理调控和规划海岸线、滩涂、浅海、深水区的资源开发利用布局，包括合理规划城市岸线、生产岸线、生态岸线的布局，按照海湾型生态城市模式进行发展。

（3）需要说明的是，反映湿地累积生态效应指数的指示因子（港湾湿地水动力环境、水质环境、生物生态环境、地形地貌、景观环境）属于难以量化的复杂因子，其权重和分等定级及其得分评估具有不确定性，因此该模型还有待进一步与空间模型相结合。

References：

[1] Chen B, Wan G J, Zhang Y S. Impact of reclamation activities on marine environment in Quanzhou Bay. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2004, 23(2): 192－198.

[2] French P. Coastal and estuaries management. London: Routledge, 1997.

[3] Chen B, Zhang L P. Practice on Strategic Environmental Assessment of Harbor Planning. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22 (2): 1013 - 1018.
[4] Costanza R, Andrade F, Antunes P, *et al*. Principles for sustainable governance of the oceans. Science, 1998, 281: 198 - 199.
[5] Haslett S. Coastal systems. London: Routledge, 2000.
[6] Rosen C. World Resources 2000 - 2001: People and ecosystems: The fraying web of life. New York: Elsevier Science, 2000.
[7] Lin G L, Zuo Y H. Cumulative Ecological Effects Assessment on Resource Exploitation and Utilization in Bay. Journal of Natural Resources, 2006, 21 (6): 432 - 440.
[8] Wang Q F. Advanced System Dynamics. Beijing: Tinghua University Press, 1995.
[9] Wang Q F. System Dynamics. Beijing: Tinghua University Press, 1993.
[0] Robinson J B. Modeling the interactions between human and natural systems. International Social Science Journal, 1991, (30): 629 - 647.
[1] Ruth M, B Hannon. Modeling dynamic economic systems. Springer-verlag, New York, 1997.
[2] Costanza R, Ruth M. Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. Environmenal Management, 1998, 22 (2): 183 - 195.
[3] Dennis L. Meadows, *et al*. The Limits to Growth. New York: Universe Books, 1974.
[4] Vizayakumar K, Mohapatra P K J. Environmental impact analysis of a coalfield. Journal of Environment Management, 1993, 4, 73 - 93.
[5] Vizayakumar K, Mohapatra P K J. Modelling and simulation of environmental impacts of coalfield: system dynamics approach. Journal of Environmental Systems, 1993, 22, 59 - 73.
[6] Guneralp B, Barlas Y. Dynamic modelling of a shallow fresh water lake for ecological and economic sustainability. Ecological Modelling, 2003, 167, 115 - 138.
[7] Guo H C, Liu L, Huang G H, *et al*. A system dynamics approach for regional environmental planning and management. A study for the lake Erhai Basin. Journal of Environmental Management, 2001, 61, 93 - 111.
[8] Tang J, She X Y, Lin N F. A study on system dynam ics model in eco-env ironmen t plann ing for Da'an of Jilin Province. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (6): 1178 - 1183.
[9] Saysel A K, Barlas Y, Yenig O. Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. Journal of Environmental Management, 2002, 64, 247 - 260.
[20] Costanza R, Ruth M. Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. Environmenal management, 1998, 22 (2): 183 - 195.
[21] Costanza R, Duplisea D, Kautsky U. Modelling ecological and economic systems with STELLA. Ecological Modelling, 1998, 110, 1 - 4.
[22] Costanza R, Gottlieb S. Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II. Ecological Modelling, 1998, 112, 81 - 84.
[23] Costanza R. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. Ecological Modelling, 2001, 143, 1 - 7.
[24] Costanza R, Wainger L, Folke C, *et al*. Modelling complex ecological economic systems: toward an evolutionary, dynamic understanding of people and nature. BioScience, 1993, 43, 545 - 555.
[25] Shi T, Gillb R. Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in China: the case study of Jinshan County with a systems dynamics model. Ecological Economics, 2005, 53, 223 - 246.
[26] Burak G, Yaman B. Dynamic modeling of a shallow freshwater lake for ecological and economic sustainability. Ecological Modelling, 2003, 167, 115 - 138.
[27] Azous A L and Horner R R. Wetlands and urbanization: implications for the future. Boca Raton: Lewis Publishers, 2001.
[28] Zedler J B and Leach M K. Managing urban wetlands for multiple use: research, restoration, and recreation. Urban Ecosystems, 1998, 2: 189 - 204.
[29] Ventana Systems, Inc. Vensim PLE software version 5.4a. Ventana Systems, Inc., 60 Jacob Gates Road, Harvard, Massachusetts, 2003.
[30] Liu H Y, Lu X G, Zhang S K. Progress on the Study of Process of Wetland Landscape Changes and Cumulative Environmental Effects. Progress in Geography, 2003, 22 (): 60 - 70.
[31] Yang X A, Xue X Z. Cumulative impact assessment on coastal engineering: a case study of the Xiamen Western Sea, Marine Sciences, 2004, 28 (): 76 - 78.
[32] Kass Green, Steve Bernath, Lisa Lackey, *et al*. Analyzing the Cumulative Effects of Forest Practices: Where Do We Start? Wetland and Enviornmental Application of GIS. CRC Press. Inc., 1995.
[33] Barry S, Harry S. Methods for Cumulative Effects Assessment. Environmental Impact Assessment Review. 1995, 15: 81 - 106.
[34] Mohapatra P K, Mandal P, Bora M C, Introduction to System Dynamics Modeling. Hyderabad, India: Orient Longman Ltd, 1994.

参考文献:

[1] 陈彬,王金坑,张玉生,等. 泉州湾围海工程对海洋环境的影响. 台湾海峡, 2004, 23 (2): 192 ~ 198.
[3] 陈彬,张珞平. 港口规划的战略环境评价实践. 上海环境科学, 2003, 22 (2): 1013 ~ 1018.
[7] 林桂兰,左玉辉. 海湾资源开发的累积生态效应研究. 自然资源学报, 2006, 21 (6): 432 ~ 440.
[8] 王其藩. 高级系统动力学. 北京:清华大学出版社, 1995.
[9] 王其藩. 系统动力学. 北京:清华大学出版社, 1993.
[8] 汤洁,佘孝云,林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型. 生态学报, 2005, 25 (6): 1178 ~ 1183.
[30] 刘红玉,吕宪国,张世奎. 湿地景观变化过程与累积环境效应研究进展. 地理科学进展, 2003, 22 (): 60 ~ 70.
[31] 杨喜爱,薛雄志. 海岸工程累积环境影响评价:厦门西海域案例研究. 海洋科学, 2004, 28 (): 76 ~ 78.