

文章编号: 1007-4619 (2000) 02-0118-07

基于 GIS-SD 的大连湾水污染时空模拟 与调控策略研究

裴相斌¹, 赵冬至²

(1. 中国科学院 地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 国家海洋局环境保护研究所, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 大连湾可持续发展的矛盾是一个动态现象,同时这些矛盾也涉及到空间因子(例如,污染物浓度分布与环境功能区划等)。为了探讨和模拟各种发展方案(不同的经济增长和城市化)的矛盾机理,将系统动力学(SD)方法和地理信息系统(GIS)方法结合起来,提出了一个新的可操作的 GIS-SD 结合的概念框架,建立了大连湾水污染与控制系统模型,并进行了时空模拟和调控策略研究,模拟了该区域的不同增长计划(方案)对海域环境质量的影响。从而可以帮助决策者在二维空间上考虑动态的环境与发展的矛盾,并借助于 SD 的多方案实验方法提供解决办法的供选策略。SD(动态模拟)和 GIS(空间模拟)结合的方法可以互补 GIS 和 SD 的优缺点,可以更全面地描述、解析和模拟一个复杂系统(例如复杂结构、时间动态和空间因素等),有助于解决复杂系统问题。

关键词: 大连湾; 水污染控制系统; 地理信息系统; 系统动力学; 时空模拟; 调控策略

中图分类号: TP79/X55 **文献标识码:** A

1 前 言

大连湾海域水体污染是在工业化和城市化过程中出现的环境问题。随着工业的迅猛发展和城市人口的增加,大连湾水体环境质量不断恶化,已引起人们的关注。因此,在经济快速发展的新时期,如何在保证经济快速增长的同时,又要控制海湾污染,改善环境质量,是当前亟待解决的突出问题。我们把海湾水体污染与控制作为一个系统,并从这个系统的整体性和动态性出发来研究系统的行为,为恢复和调控大连湾生态系统提供依据。

海岸带作为一个动态、开放复杂的系统,由于其所具有的突出的区位、资源和经济优势,成为近年来国际上研究的热点。目前已有的手段仅仅是将科学资料以数据库的形式贮藏起来,在管理时提取这些数据作为决策的依据^[1],缺乏复杂的综合的动态的模型研究。在制定区域性社会经济发展规划,以及约束不利于可持续发展的人类活动方面,也缺乏调控的决策依据。为了实现海岸带可持续发展,需要有一体化的管理。因此,我们必须把海岸带的经济

发展、城市化进程和海洋环境保护统一起来研究,建立复杂的海岸带系统时空模型。为海岸带管理的系统化、信息化、科学化、规范化提供依据。

2 方法论

系统动力学(System Dynamics 缩写 SD)是一门分析研究信息反馈系统的学科,也是一门认识系统问题和解决系统问题的综合性学科。从系统方法论来说,系统动力学的方法是结构方法、功能方法和历史方法的统一^[2]。系统动力学模型的模拟是一种结构、功能的模拟,它适用于研究复杂系统的结构、功能与动态行为之间的关系。它能对系统进行动态仿真实验,考察系统在不同参数或不同策略因素输入时的系统动态变化行为和趋势。它可对系统设定各种控制因素,通过改变输入的控制因素,模拟不同政策条件下的系统动态行为,从而对决策者提供依据。系统动力学模型可描述系统的复杂结构,更好地理解系统内部的复杂关系,并也用来模拟复杂系统未来的发展变化。基于差分方程的系统动力学模型在时间尺度上模拟系统的动态行为是有效的。但是,

收稿日期: 1998-10-23; 修订日期: 1999-01-08

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 裴相斌(1963-),男,1999年于中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室获博士学位。研究方向:GIS在城市和环境中的应用。现已发表论文10余篇。

这种信息反馈系统模型不能考虑许多空间因素(例如:污染物浓度的空间分布格局的变化),这种多环反馈模型不能处理大量的空间数据,也不能描述和模拟系统的空间要素及其状态。

GIS 是一个分析和模拟空间现象的技术方法,它可以很好地描述和模拟系统的空间要素及其状态。尽管 GIS 具有处理空间数据及其表达空间信息的能力,但目前 GIS 处理的数据是静态数据,并且在 GIS 空间领域中也较少考虑空间动态。然而现实世界很多问题是复杂的动态系统。

从上述讨论中,可以看到,GIS 模拟(空间模拟)和系统动力学模拟(非空间模拟)各具优缺点。因此,在 GIS 和 SD 之间建立联结,综合两个领域的优势,无论在理论上还是在实际应用中都是有益的。本研究就是努力提出一个新的可操作的概念框架以建立非空间模拟(SD)和空间模拟(GIS)之间的联结。GIS 是分析和模拟地理现象的工具,而 SD 是用于分析模拟社会、经济和环境系统现象及其系统可持续发展的规划工具。这两种方法结合在一起可以更好地提供不同的可行的发展方案。从而扩展了 GIS 和 SD 的现有功能,这有助于规划复杂系统。我们结合了这两个技术的优点,非空间模拟 SD 和 GIS 空间模拟的联结使我们不仅能在时间上模拟动态现象,而且能在可持续发展的框架内考虑空间因素。

不同的方法可用以处理不同的问题。动态模型产生的动态信息可被用来预期空间数据的将来变化,GIS 可以将时间序列信息用时间序列的空间数据(地图)表达,即产生动态图(时间序列地图)。系统动态模型的不同策略产生不同的时间序列数据,不同的假设策略可导致不同的动态图。

3 大连湾水污染控制系统分析

3.1 大连湾概况

大连湾位于黄海北部辽东半岛南端,是一个半封闭的天然海湾,三面被陆地环抱,仅东南面与黄海相连,总面积约 174 km^2 。大连湾周连了大连市区的沙河口区、西岗区、中山区、甘井子区及开发区和金州区。大连湾周边陆地是中国各海域沿岸经济和人口密度最大的地区之一,平均人口密度为 $1288 \text{ 人}/\text{km}^2$ 。大连湾沿岸是大连市工业生产分布最集中的地区,沿岸分布有甘井子工业区、寺沟工业区和开发区等全市最主要的工业区,全区工业产值约占大连市工业总产值的 70% 以上。大连湾环境污染问题

尤为严重,是容纳大连市工业废水和生活污水的主要海域。该湾大部分海域水质超标,污染严重,造成大量生物死亡,水产养殖损失惨重。大连湾水体主要污染物为 COD、无机氮、油类和无机磷等。

3.2 水污染控制系统分析

大连湾的水污染,主要是由工业、生活、农业污染(如化肥、农药)和海水养殖污染及港口污染造成的。由于工业和生活污染是大连湾的主要污染源,因此在本研究中略去了养殖业、港口和农业污染等。本研究主要内容是大连湾沿岸人口增长,经济发展和沿岸工业化、城市化对海湾水域环境质量的影响,以及海域水环境质量评价信息的反馈与工业发展速度、人口增长率和陆源污染物入海的空间分配模式的调控。对于大连湾水污染控制系统,我们试图建立 3 个子模型,来全面描述整个系统的动态行为(图 1)。人口、工业污染子系统可视为陆地排污控制子系统,对其拟建立一个系统动力学模型。

对海湾水域水质子系统,应用污染物输入——纳污水域响应模型,在 GIS 的环境中模拟不同策略方案的海湾水域水质响应状况。空间分配模型是陆源污染物入海时的空间上的分配模式。SD 模型运行结果通过空间分配模型与污染物输入——纳污水域响应模拟连接,使陆地排污控制子系统输出的污水水量和水质可进入海湾水域水质子系统。从而我们可以模拟或预报各种方案下的大连湾海域的水质状态。如果大连湾水质不满足各功能区规定的水质目标,可反馈到陆地污染控制子系统,以便重新修订方案,再在 SD 模型上进行仿真实验。然后,再对大连湾水质进行模拟。通过以上过程,即可全面反映整个大连湾水污染控制系统的动态变化趋势。

4 大连湾水污染控制系统动力学模型的建立

4.1 系统边界

因为市内 4 区(中山区、西岗区、沙河口区和甘井子区)工业废水和生活污水通过寺儿沟排水区、青泥洼桥排水区、春柳河排水区和甘井子排水区排入大连湾,此外金州开发区工业废水与生活污水全部经市政管网进入开发区污水处理厂,经三级处理后排入大连湾。大连湾是全市区工业废水和生活污水排放的主要场所^[5]。同时,为了考虑行政界线的完整性和政策的可实施性,我们确定系统的陆域边界

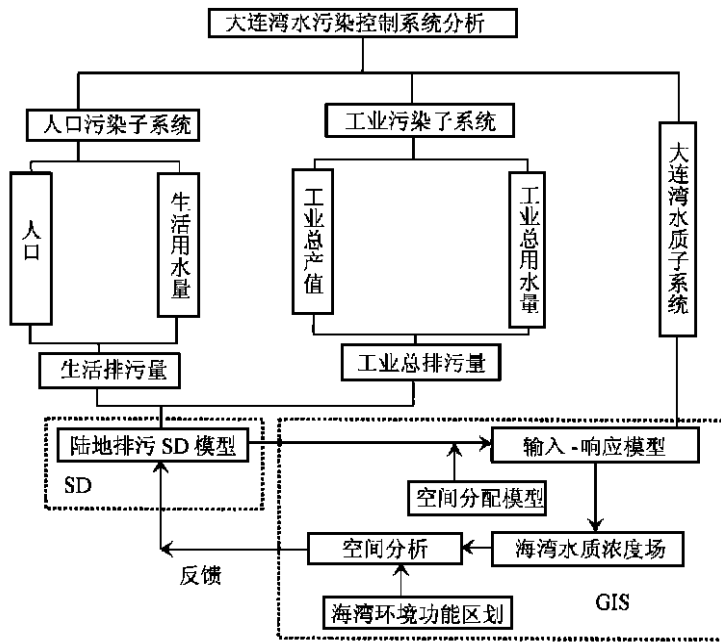


图1 大连湾水污染控制系统分析

Fig. 1 The water pollution-controlling system analysis for Dalian gulf

为大连湾周连的大连市市内4区和金州开发区。大连湾的海域边界为地理定义的大连湾湾口线。

4.2 因果分析和系统流图

根据研究目标和大连湾流域水环境系统分析,选择组成系统的各要素,并分析其因果关系。在因果关系分析基础上,将因果关系图中要素归属为不同的变量类型,以系统流图形式反映出来(污染物以COD为例),见图2。

4.3 变量间数学关系以及待估参数的确定

变量之间的关系一般应用数学函数形式表达。但是有时由于数据不足或函数关系复杂,因而,实际上很难对各变量之间的关系用严格的数学函数关系加以表达。因此必须采用简化、近似、概括等方法进行处理,以确定变量间的数学关系(定量关系)。本研究采用了灰色系统预测、建立表函数以及依据调查与统计数据估测参数并进行一些必要的检验等方

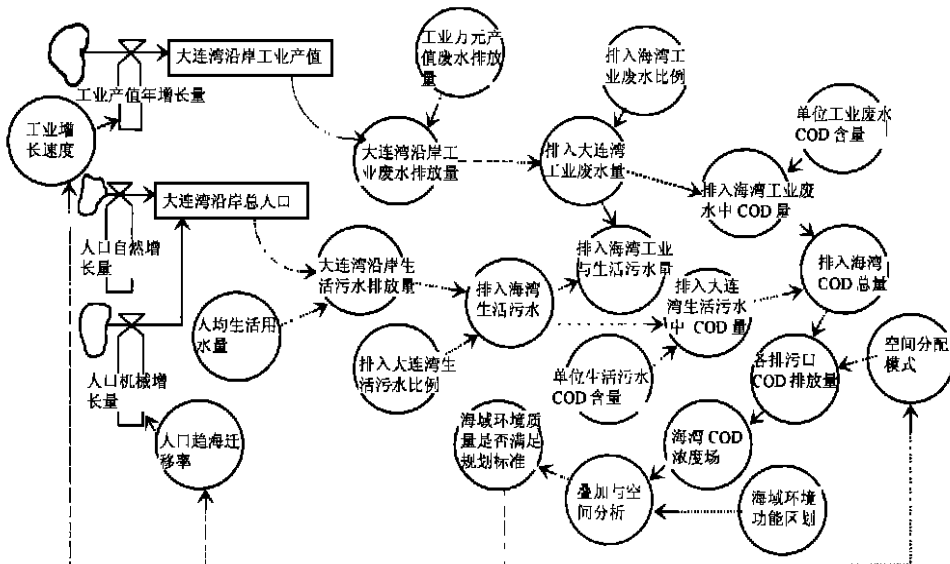


图2 大连湾水污染控制系统动力学流程图

Fig. 2 The system dynamics flow chart of the water pollution-controlling system for Dalian gulf

法。将复杂的函数关系加以简化,并确定模型中的参数值。例如:

(1)利用历史统计资料,应用灰色系统方法,建立大连市工业万元产值废水排放量的 $GM(1,1)$ 模型(起始年为 1991 年):

$$X_{t+1} = -3510.383e^{-0.02799749t} + 3633.783 \quad (1)$$

模型建立后,必须经过检验并确定模型具有可靠性后,方可应用。在此,我们采用后验差比值 $c = S_2/S_1$,以及小概率误差 P 方法来检验模型预测精度。模型(1)的 $c = 0.3102076 < 0.35$,且 $P = 1 > 0.95$,因此该模型可靠。

(2)工业排放废水中 COD 含量,亦采用上述方法建立模型。利用历史统计数据,建立工业排放废水中 COD 含量的 $GM(1,1)$ 模型(起始年为 1993 年):

$$X_{t+1} = -25.49267e^{-0.02810025t} + 26.34067 \quad (2)$$

模型(2)的后验差比值 $C = 0.417636$,而 $P = 1$ 。故该模型计算精度较好。

(3)大连湾沿岸工业废水排入大连湾的比例受工业空间布局的影响。这些年,一些污染严重的企业陆续迁出了工业废水排入大连湾的排水区,从而减少了大连湾的工业污染负荷,对改善海域环境质量起一定的作用。因此,这里用表函数表示排入大连湾的工业废水排放量与大连湾沿岸工业废水排放量之间的比例关系。

(4)大连湾沿岸的生活污水排入大连湾的比例受大连市排水系统的影响。由于过去“全市生活污水经大连湾沿岸排污口排入大连湾海域”^[3],给大连湾水质带来严重影响。目前,市内中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区的生活污水仍通过寺几沟排水区、青泥洼桥排水区、春柳河排水区和甘井子排水区排入大连湾。而且随着城市化水平的迅速提高,大连市城市人口的增加,生活污水排放量还将增加。因此,今后,改造排水系统,减少排入大连湾的生活污水量也是改善大连湾海域环境质量的一条途径。大连湾沿岸市区排入大连湾的生活污水量与生活污水总量之间比例关系用表函数表示。

(5)生活污水年排放量采用公式 $Q_r = \beta * Q_w$,其中 Q_r 为生活污水年排放量(10^4 t/a); Q_w 为生活年用水量, β 为系数,一般取 0.9。人均生活用水量随生活水平的提高而增长,并用表函数表示这种关系。生活污水中 COD 含量为 250 mg/L ^[4]。

根据历史统计数据确定水平变量的初值。根据

历史统计数据、发展规划数据及海湾水质保护目标的反馈信息确定决策变量,并不断进行调整,直到获得满意的决策方案。

5 大连湾水污染时空模拟与调控策略

5.1 决策方案设计思想

政策实验就是通过选择模型中某些决策点作为决策因子,由这些决策因子进行不同组合,即得到不同决策方案。然后将每个决策方案在模型上进行仿真实验,经过多次反馈调整决策方案和仿真实验,以获得反映系统动态行为并能达到系统目标的政策方案。

工业增长速度和人口增长速度,以及陆源污染入海的空间分配模式都直接影响海湾水域的水质状态。在 SD 模型中,共选择了 2 个决策点,即工业增长速度和人口增长速度(尤其是城市化过程所引起的人口机械增长速度)。在 GIS 模拟中选择陆源污染入海的空间分配模式为另一决策点。系统模拟的目的在于调控系统的决策因子,以达到大连湾沿岸的工业增长、城市发展和海湾水域环境保护目标,并将大连湾沿岸城市可持续发展与大连湾海域可持续发展结合起来,促进海岸带的可持续发展。由于污染子系统输出的污水水量和水质是海湾水质子系统的输入。因此,我们将 SD 模型的运行结果,在 GIS 的环境中按不同的陆源污染物排海的空间分配模式输入大连湾海域水质子系统的输入——响应模型,来模拟该海域的水质浓度场,并将水质浓度场与海湾环境功能区划进行叠加对比与空间分析,看其是否满足水质控制目标(是否达到环境保护目标)。通过多种政策方案的试验,来寻求最佳的决策方案。

5.2 模拟结果与分析

我们设计了多种决策方案,考察每种决策方案的运行结果并对其进行比较分析。这里我们列举了 3 种具代表性的政策方案的模拟结果。

(1)方案 1。假定工业增长速度为 12%,人口机械迁入率为 0.12%,空间分配模式按原排污口的排污比例,则海湾水域对污水排放的响应结果,即海湾水质状况(以 COD 为例,COD 的浓度值单位为 mg/L)见图 3。

(2)方案 2。工业增长率为 14%,人口机械迁入率为 0.1%,大连湾沿岸污染物入海空间分配模式

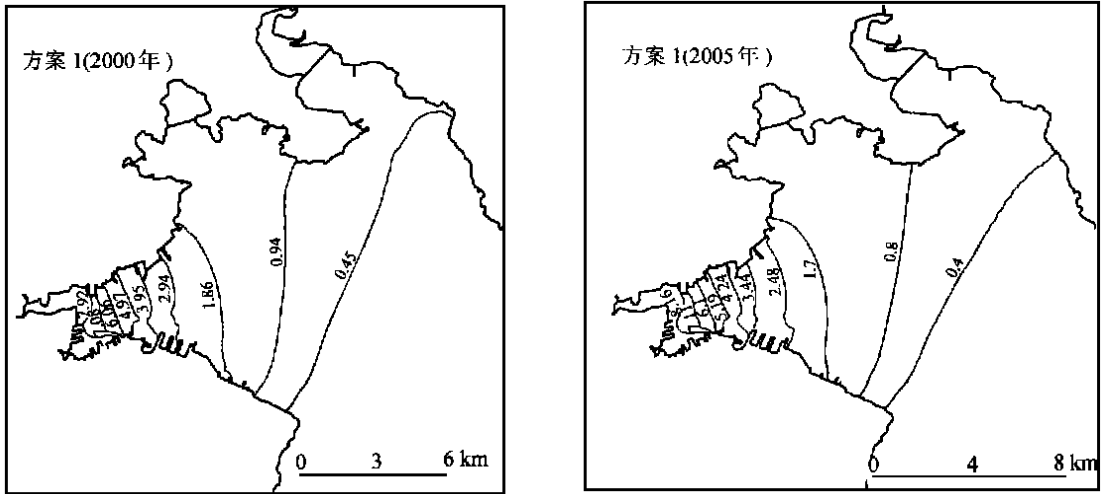


图 3 大连湾海域 COD 浓度时空分布图

Fig. 3 The temporal-spatial distribution of COD concentration in the sea area of the Dalian gulf

采用空间分配优化模式¹⁾, 则海湾水域对污水排放的响应结果, 即海湾水质状况(以 COD 为例, COD 的

浓度值单位为 mg/L)见图 4。

(3)方案 3。工业增长率为 16%, 人口机械迁入

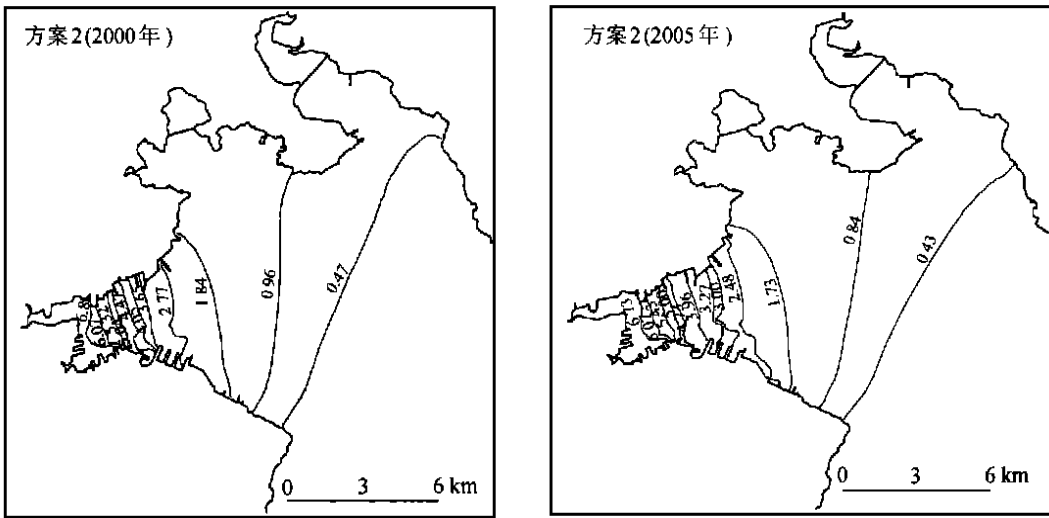


图 4 大连湾海域 COD 浓度时空分布图

Fig. 4 The temporal-spatial distribution of COD concentration in the sea area of the Dalian gulf

率为 0.1%, 大连湾沿岸污染物入海空间分配模式采用国家海洋环境监测中心制定的大连湾污染总量控制方案的空间分配模式²⁾, 则海湾水域对污水排放的响应结果, 即海湾水质状态(以 COD 为例, COD 的浓度值单位为 mg/L)见图 5。

岸地区工业增长速度 14%, 人口机械增长率 0.1%, 空间分配模式为优化模式。这个方案, 既有利于大连湾沿岸地区的经济增长又有利于保护海域环境质量, 是一个将大连湾沿岸城市可持续发展与大连湾海域可持续发展结合起来以促进海岸带的可持续发展的方案。

通过分析, 我们认为, 方案 2 较好, 即大连湾沿

1) 裴相斌等. 基于 GIS 的海湾陆源污染排海总量控制的空间优化分配方法研究——以大连湾为例(待发).

2) 国家海洋环境监测中心. 大连湾及其毗邻海域综合管理研究报告(上下册), 1995. House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

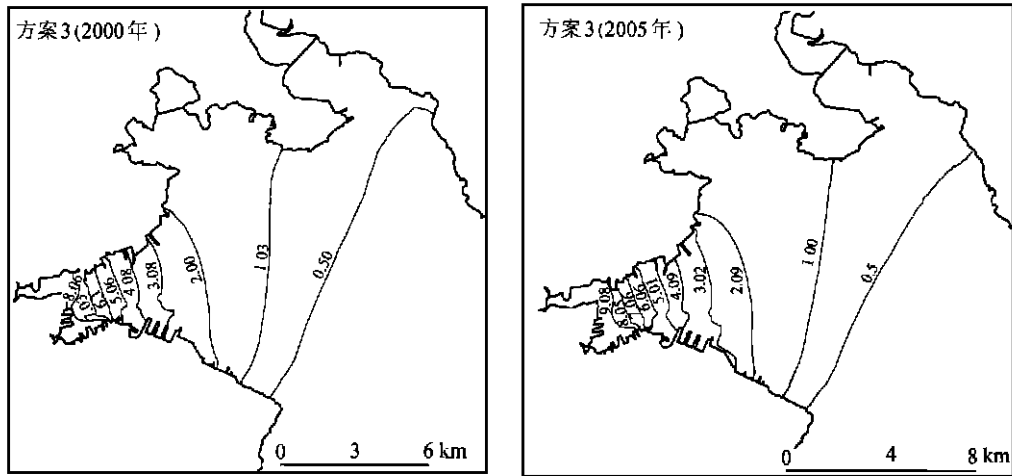


图5 大连湾海域 COD 浓度时空分布图

Fig. 5 The temporal-spatial distribution of COD concentration in the sea area of the Dalian gulf

6 结论

大连湾地区的可持续发展的矛盾是一个动态现象,同时这些矛盾也涉及到空间因子(例如,污染物浓度场与环境功能区划,以及依据海洋环境功能区划确定陆源污染允许排放量)。为了能探讨和模拟各种方案的矛盾机理,我们需将SD和GIS模型结合起来。这种综合的时空模型是集中在时空的动态模拟。帮助研究者在二维空间上考虑动态的环境与发展矛盾。并借助于SD的多方案实验技术提供解决办法的供选策略。

系统动力学模型和地理信息系统的结合有广阔的解决问题的潜力。GIS和SD模型的优缺点互补可以更全面地描述一个复杂系统。SD模型可以描述系统的复杂结构,用于系统未来发展的模拟,但它不能表达空间信息,并且也没有处理大量空间数据的能力;而GIS具有处理空间数据和表达空间信息的能力,但目前的GIS的空间数据往往是静态的。

因此,可用SD模型评价系统结构,用GIS处理空间数据。动态模型产生系统时间序列描述。然

后,用GIS产生空间描述(地图)。不同的策略条件下,动态模型可产生对应的时间序列数据,例如污染物排放的时间序列数据。不同的假设策略也可导致不同的动态图。从而,在时空维上更好地模拟复杂系统,为决策提供科学依据。因此,面向政策的集成系统和改进并扩展现有GIS功能的日益增长的需求,有助于对复杂问题评价和规划。

致谢 本研究得到了“大连湾陆源污染总量控制数据库”的支持,得到了导师陈述彭先生的指导,特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] Gao Shu. Preliminary Thoughts on a 'Robust Management Model' for Coastal Development. *Ocean Science*[J], 1998, (1): 30-33. [高抒. 关于海岩带开发“稳健管理模型”的初步设想. *海洋科学*[J], 1998, (1): 30-33.]
- [2] Wang Qifan. *System Dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. [王其藩. *系统动力学*[M]. 北京:清华大学出版社,1988.]
- [3] Zhao Kezhi. *Water Environmental Function Regionalization in Liaoning Province* [M]. Shenyang: Liaoning Education Press, 1994. [赵克智. *辽宁水域环境功能区划*[M]. 沈阳:辽宁教育出版社,1994.]

A GIS-SD-based Spatio-temporal Modelling and Regulating Policies on Water Pollution in Dalian Gulf

PEI Xiang-bin¹, ZHAO Dong-zhi²

(1. *The State Key Lab of Resources and Environment Information System, The Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *National Center of Marine Environmental Monitoring, Dalian 116023, China*)

Abstract: The contradictions for sustainable development of Dalian gulf are dynamic. These contradictions involve spatial factors (e.g. the concentration distribution of pollutants and environmental function division, etc.). In order to deal with and simulate contradictory mechanisms of various developing plans (various economic increase plans and urbanization plans) of the area along Dalian gulf, this paper puts forward a new conceptual GIS-SD frame in order to simulate the water pollution-controlling system of Dalian gulf. The model of the system is built. The water pollution of Dalian gulf is modeled temporally and spatially, and regulating strategies are worked out. This paper simulates the impacts on environmental quality of Dalian gulf by various development plans of the area. The combination of SD (Dynamic Modelling) and GIS (Spatial Modelling) are mutually complementary. This may describe, analyze and stimulate a complex system (e.g. complex structure, timely dynamics, and spatial factors, etc.), and contribute to solve complex system problems. This helps decision-maker consider dynamic contradictions of environment and development in two dimensions.

Key words: dalian gulf; water pollution; geographic information system (GIS); system dynamics (SD); spatio-temporal modelling; regulating strategies