基于系统动力学的大连市可持续发展模型模拟分析*

王耕[1,2],魏辽生[2]

(1.辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心 大连 116029;2.辽宁师范大学城市与环境学院 大连 116029)

摘要:可持续发展系统是一种动态的复杂大系统,而系统动力学能很好地研究可持续发展问题。基于可持续发展理论,用系统动力学方法选取大连市人口、经济、环境和水资源子系统,采用系统动力学软件Vensim PLE构建大连市可持续发展模型。模型对大连市2020年发展情况进行了模拟,并针对大连市可持续发展制约因子进行情景分析。结果表明:模拟的经济发展速度落后于规划目标;现行的环保投资力度跟不上社会发展需求;水资源供需矛盾突出。促进大连市可持续发展,必须采取调整产业结构、加大环保投资力度、开源节流水资源、提高水质等一系列措施。

关键词:可持续发展;系统动力学;大连市;模型

中图分类号:F299.27;F224;X22 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-9857(2015)02-0090-8

1 引言

可持续发展的概念最早在1972年的联合国人类环境研讨会上正式讨论,1987年世界环境与发展委员会出版的《我们共同的未来》报告将可持续发展定义为:"既能满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展"。该定义被广泛接受。我国已经将可持续发展战略纳入我国的经济和社会发展的长远规划。城市作为一个地区的政治、经济、文化中心,其可持续发展在我国可持续发展中占有重要地位。

从系统的观点看,可持续发展是资源、环境、经济和社会多个系统相互作用、相互影响的复杂大系统。系统动力学是一门基于系统论,吸取反馈理论与信息论的精髓,并借助计算机模拟技术融诸家于一炉,脱颖而出的交叉新学科。系统动力学以结构-功能模拟为模拟技术,能定性与定量地分析研究系统,是社会、经济、生态复杂大系统的"实验室"[1]。系统动力学是地理科学研究的重要方法,近年来国内外很多学者应用该方法建立模型,模拟区域或城市的可持续发展状态,并提出相应的对策和建议。如Shen Qiping等[2]建立了可持续的土地利用和香港城市发展的系统动力学模型,模拟比较各项政策带来的不同动态后果,从而实现土地可持续利用目标;佟贺丰等[3]以北京市为例构建城市可持续发展系统动力学模型,指出北京未来可持续发展中存在的问题并提出对策建议;张子珩等[4]以乌海市为例构建可持续发展系统动力学模型,并根据仿真结果提出一系列可持续发展的措施;姚建、师满江、李杰兰、程叶青等[5-8]分别以不同区域构建了区域可持续发展系统动力学模型,通过模拟比较不同发展方案的结果给地区可持续发展决策提供参考和理论依据;许光清、宋世涛、马国丰等[9-11]对近年国内外关于系统动力学模型应用于可持续发展的研究做了梳理总结,并在此基础上指出进一步的研究方向。总结可持续发展的系统动力学研究,国外研究较成熟且充分,仿真模拟效果良好。国内研究以可持续发展评价为主流,系统仿真模拟分析薄弱,尤以制约性因子的情景分析为少见。目前不少学者用各种方法从不同角度对大连市的可持续发展进行研究,但多以对大连市的可持续发展状况的静态评价为主[11-20]。

大连市位于中国东北辽东半岛最南端,三面环海,国土面积为12 573 km^2,人口大约590万。大连市是东北地区的重要沿海港口、工业、贸易

* **基金项目**:教育部人文社科规划基金项目(13YJA790111);辽宁省人文社科重点研究基地专项项目(ZJ2014030).

和旅游城市，是中国东北重要的对外门户。随着沿海经济带的快速发展，资源与环境等因素愈加制约大连市可持续发展，因此，研究大连市可持续发展系统，为制定可持续发展政策提供科学依据意义重大。系统动力学模型能够动态的模拟可持续发展，而且可以模拟各种决策，有助于为制定可持续发展措施提供依据。本研究利用系统动力学 Vensim 软件，选取沿海人口、水资源、环境与经济发展问题突出的大连市，构建城市可持续发展模型，以水资源、环境为制约因子进行仿真模拟，旨在完善区域可持续发展建模过程，为大连实际发展提供可借鉴的对策与建议。

2　模型构建

本研究采用 Vensim PLE 软件进行建模、检验、模拟。任何模型都不可能和实际系统毫无差别，通过对大连市可持续发展的系统分析，选取主要子模块构建模型。依据 SD 建模原则和建模方法，大连市可持续发展模型由人口、水资源、环境和经济四大子系统构成，通过人口、水资源、环境、经济子系统之间的相互关系连接在一起。

2.1　大连市 SD 模型的数据和参数设定

大连市可持续发展 SD 模型空间边界包括 6 个市辖区、1 个县、3 个县级市，共 12 574 km^2。时间边界从 2005—2020 年，其中 2005—2011 年间的各项数据用来校准和调试模型。模型中的数据和参数主要来源于 2005—2011 年《大连市统计年鉴》和《大连市水资源公报》，部分参数和数据参考研究区域相关规划文件。模型的参数实际上是随时间推移而不断变化的，但模型并非现实的重现，必须以数学方法确定其值，根据对历史数据的观察分析，对不同性质的参数采用与其相适应的方法得出。模型参数的确定主要通过以下方法得到：① 利用历史统计资料做算术平均数。如：多年平均水资源总量（31 亿 m^3），人均生活污水排放量（50.2 t），单位绿地需水量（0.006 68 亿 m^3），单位废气处理耗资（1.95 亿元）等；② 根据统计数据结合经验判断，采用趋势外推来取值，或以表函数表达。如：绿化覆盖率年均增长（0.005），第一产业年均增幅（0.08），年均人口机械增长率（0.004）等；③ 利用统计数据做回归分析，用 time 的表函数表示。模型中时间步长用 d_t 表示，本模型中设置 d_t＝1a。

2.2　大连市 SD 模型的系统分析

2.2.1　人口子系统

人口子系统是地区可持续发展的重要组成部分。大连市 2001—2011 年的数据表明：大连市人口变动的主要因素为人口迁入和人口迁出，人口平均自然增长率为 0.52‰，而平均机械增长率为 5.5‰，显然机械变动是人口变动的主要因素。出生率和死亡率有所波动，但相对平稳，机械增长率先增长后下降，在 2006 年最高达到 10.5‰，之后缓慢降低。人口的迁入迁出受城市引力作用，以及生活水平、环境、工作、医疗、教育等因素的影响，关系复杂，因缺乏数据本模型未做探讨。城市化率呈增长趋势，用趋势外推法得出，在模型中用 time 的表函数表达。模型中出生率、死亡率和机械增长率以 time 的表函数表达，主要方程如下：

总人口＝INTEG(出生口＋机械增长人口－死亡人口，人口初值)

出生人口＝出生率×总人口

死亡人口＝死亡率×总人口

机械增长人口＝机械增长率×总人口

非农人口＝城市化率×总人口

农村人口＝总人口－非农人口

2.2.2　经济子系统

研究区域工业基础雄厚，工业门类齐全。随着国家进一步实施振兴东北老工业基地和辽宁沿海经济带发展战略，大连的第二产业必然会进一步增长。作为东北亚的国际航运中心、物流中心、区域金融中心，第三产业在推动全市经济发展中占有很大的比重。全市 GDP 由 2001 年的 1 242 亿元增长到 2011 年的 5 066 亿元，经济增长迅速。三次产业比重从 2001 年 8.9∶46.8∶44 发展到 2011 年的 6.4∶52.1∶41.5，从中可以看出三大产业中第一产业所占比重一直较小，第二、第三产业所占比重较大。由于大连市的农业产值比重很小，模型中第一产业产值增加率由表函数外部生成。工业模块由柯布－道格拉斯生产函数生成，柯布－道格拉斯生产函数是于 20 世纪 30 年代由数学家柯布（C. W. Cobb）和经济学家道格拉斯（PaulH. Douglas）提出来的。柯布—道格拉斯生产函数被认为是一种很有用的

生产函数。柯布－道格拉斯生产函数的基本形式表示如下

$$Y = A \times K^{\alpha} \times L^{\beta} \quad (1)$$

式中：Y 是工业总产值；A 全要素生产率(TFP)；L 是投入的劳动力数(单位是万人或人)；K 是投入的资本，一般指固定资产净值(单位是亿元或万元，但必须与劳动力数的单位相对应，如劳动力用万人作单位，固定资产净值就用亿元作单位)；α 是劳动力产出的弹性系数；β 是资本产出的弹性系数($0<\alpha<1$，$0<\beta<1$)。用大连市统计资料进行回归。

回归方程：

$$\ln Y = 1.609\ 606 + 0.582\ 231 \times \ln K + 0.461\ 032 \times \ln L \quad (2)$$

拟合度检验，拟合优度 $R=0.990\ 404$，调整后的拟合优度 $R_A=0.985\ 605$，模型的拟合优度比较高，说明对样本的拟合效果比较好，模型的解释能力比较强。模型通过了 F 检验，$F=0.000\ 92$ 说明该回归方程回归效果显著。资本投入和劳动力的 t 统计量的 P 值分别为 0.001 74 和 0.024 236，都小于显著性水平 0.05，因此 α 和 β 的估计值都能通过 t 检验。求得 $A=5.008\ 41$，$\alpha=0.582\ 231$ 和 $\beta=0.461\ 032$，因为 α 和 β 分别为固定资本投入和劳动投入量对总产出的贡献份额，所以有 $0<\alpha<1$，$0<\beta<1$，因此 α 和 β 的估计值可以通过经济意义的检验。

由于第三产业利用柯布－道格拉斯生产函数进行回归后，只通过了 F 检验($F=0.002\ 36$)而未能通过 t 检验，所以不能用柯布－道格拉斯生产函数表达。第三产业又称服务业，与人口和人均可支配收入关系密切，用统计资料进行相关分析，结果表明大连市第三产业与人均可支配收入相关系数为 0.997 6，而第三产业与人口的相关性不明显。对其进行回归后得到第三产业产值和人均可支配收入的函数。人均可支配收入与人口和 GDP 等因素有关，把人均可支配收入增加值与人均 GDP 做回归分析，得到人均 GDP 和人均可支配收入增加值的函数关系。第二产业劳动投入和资本投入经统计资料趋势外推后由表函数表达。经济子系统主要方程如下：

第一产业产值＝INTEG(第一产业增加量，第一产业产值初始值)

第一产业增加量＝第一产业增幅×第一产业产值

第二产业产值＝全要素生产率×第二产业资本投入^α×第二产业劳动投入^β

第三产业产值＝人均可支配收入×0.100 56－216.7

人均可支配收入＝INTEG(人均可支配收入增加，人均可支配收入初始值)

人均可支配收入增加＝人均 GDP×368

人均 GDP＝总产值/总人口

总产值＝第一产业产值＋第二产业产值＋第三产业产值

2.2.3 水资源子系统

水是一个城市发展和人民生活的重要条件，大连市三面环海，地处辽东半岛最南端，独特的地理条件使其成为水资源严重短缺的城市，人均水资源不足全国人均量的 1/4，水资源成为制约城市可持续发展的重要因素。大连市水资源系统由生活用水、工业用水、农业用水和生态用水 4 个模块构成。多年平均水资源总量为 32 m^3。农业用水量受耕地面积、灌溉水有效利用率、当年降水情况等因素影响，由于数据有限，农业用水量由耕地面积和单位耕地需水量决定，不考虑其他因素，单位耕地需水量由表函数外生。工业用水由工业产值和单位工业产值耗水量决定，单位工业产值耗水量随时间序列变化较大，故采用表函数外生。生活用水由农村生活用水和城市生活用水构成，农村人均生活用水有增长趋势，但变化不大，用常数表示，城市人均用水变化明显，呈增加趋势，由表函数外生。生态用水情况比较复杂，难以统计，这里以城市绿地需水代替。城市绿地需水量由绿地面积和单位绿地需水量决定，绿地面积由城市绿化覆盖率和建成区面积决定。水资源子系统主要方程如下：

总需水量＝生活用水量＋工业需水量＋农业需水量＋城市绿地需水量

生活用水＝农村人口×农村人均用水量＋非农人口×城市人均用水量

工业需水量＝第二产业产值×单位工业产值耗水量

农业需水量＝单位耕地需水量×耕地面积

耕地面积＝INTEG(耕地面积增加量，耕地

面积初始值）

耕地面积增加量＝耕地面积×耕地面积增加率

城市绿地需水量＝绿地面积×单位绿地需水量

绿地面积＝建成区面积×城市绿化覆盖率

2.2.4　环境子系统

环境子系统中环境污染主要为废水、废气和固体废弃物所造成的，从污染源来分又分为生产和生活两方面。由生产造成的污染中第一产业和第三产业的数据难以获得，所以只采用工业污染数据。生活中产生的污染物中废气排放量缺少统计数据难以计算，故废气产生量只采用工业废气数据。废气污染物主要包括二氧化硫、二氧化氮、粉尘等，大连市的能源以煤炭为主，本文用二氧化硫作为废气指标。污染物的治理受环保投资、技术和城市污染物治理基础设施治污能力等因素影响，因为数据限制这里只考虑环保投资的影响，环保投资由总产值和环保投资占 GDP 比例决定。环境质量指标为污染物生产量除去污染物治理量后的污染物排放量来体现。单位工业产值产废水量、单位工业产值产固废量、单位工业产值产废气量、人均生活污水排放量、人均生活固废产量、单位固废处理耗资和单位废气处理耗资采用多年平均值，单位废水处理耗资变化较大，所以由表函数外生。环境子系统主要方程如下：

废水排放量＝废水产生量－废水处理量

固废排放量＝固废产生量－固废处理量

废气排放量＝废气产生量－废气处理量

废水产生量＝工业废水＋总人口×人均生活污水排放量

固废产生量＝工业固废＋总人口×人均生活固废产量

废气产生量＝第二产业产值×单位工业产值产废气量

工业废水＝第二产业产值×单位工业产值产废水量

工业固废＝第二产业产值×单位工业产值产固废量

废水处理量＝环保投资/单位废水处理耗资

固废处理量＝环保投资/单位固废处理耗资

废气处理量＝环保投资/单位废气处理耗资

环保投资＝总产值×环保投资占 GDP 比重

2.3　模型的有效性检验

系统动力学模型的适用性与一致性的检验过程包括许多测试方法与技巧。它们可划分成 4 组：模型结构的适合性检验、模型行为的适用性检验、模型结构与实际系统的一致性检验以及模型行为与实际系统的一致性检验[1]。通过验证，本模型通过了 Vensim 软件的模型结构的适合性检验、模型行为的适用性检验、模型结构与实际系统的一致性检验。对于模型行为与实际系统的一致性检验，本研究选取总人口和总产值指标的 2005—2011 年的实际数据对其进行检验。结果表明，总人口模拟的相对误差介于－0.6%～0.6%；总产值模拟的相对误差介于－2.7%～2.7%（表 1）。从表 1 可以看出，模拟数据与历史数据有很好的拟合，可以进行实际仿真模拟（图 1 和图 2）。

表 1　模型有效性检验数值

年份	总人口/万人			总产值/亿元		
	实际值	模拟值	误差	实际值	模拟值	误差
2005	565.3	565.3	0	2 056.0	2 113	0.027 7
2006	572.0	568.5	－0.006 1	2 506.9	2 499	－0.003 1
2007	578.2	575.4	－0.004 8	2 942.0	2 926	－0.005 4
2008	583.4	581.2	－0.003 7	3 371.5	3 357	－0.004 3
2009	584.8	583.9	－0.001 5	3 877.2	3 936	0.015 1
2010	586.4	586.8	0.000 7	4 467.9	4 324	－0.032 2
2011	588.5	590.0	0.002 5	5 066.1	4 949	－0.023 1

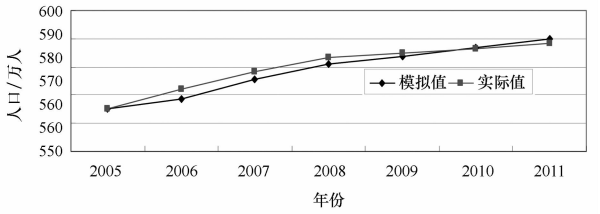

图 1 有效性检验(人口)

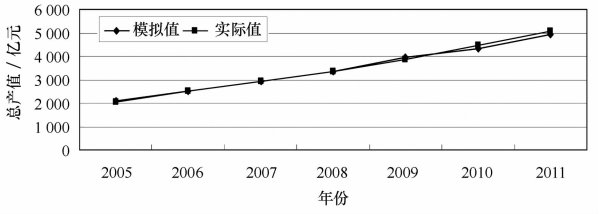

图 2 有效性检验(总产值)

3 模拟结果和情景分析

用系统动力学专用模拟分析软件 Vensim PLE 5.9,在模型中输入相应大连市统计数据,经过对模型的结构和参数的调整改进,模型模拟结果与历史数据的误差通过检验后,开始对大连市可持续发展进行仿真模拟,并利用软件对模型一些重要控制性参数进行调整,得到不同的发展情景,进行情景分析。

3.1 可持续发展模型基础模拟分析

大连市可持续发展 SD 模型经过运行之后,得出各项指标数据。其中总人口呈逐年增加趋势,总人口在 2015 年将达到 604.7 万人,2020 年将达到 629.3 万人。根据《大连市城市总体规划(2009—2020)》中的估计,2020 年,大连市人口规模将达到 950 万人,从模型中可以看出人口规模在控制范围内。人口增长中机械增长依旧占主导地位。

图 3 给出了大连市经济模块的主要数据变化趋势。到 2020 年,大连市总产值将达到11 745亿元,第二、三产业产值将分别达到 4 800 亿元和 6 387 亿元。其中第一产业贡献值依旧很小,第二、三产业产值所占比例较大。2011 年 3 次产业的比例为 6∶49∶45,2020 年三次产业比重将达到 5∶41∶54,其中第三产业产值在 2015 年开始超越第二产业产值。人均 GDP 由 2011 年的 8.38 万元增长到 2020 年的 18.6 万元。《大连市十二五规划》中到 2015 年总产值要达到 10 000 亿元,而模型模拟中到 2019 年总产值达到10 000亿元,当调整全要素生产率为 7 时,这一发展目标在 2015 年能够完成。为促进经济快速发展,需要优化产业结构,在振兴老工业的基础上,注重技术创新,依靠高新技术大力发展新兴产业;大力发展服务业,提高第三产业比重;同时要提高居民收入水平和改善生活质量,使发展成果惠及民众。

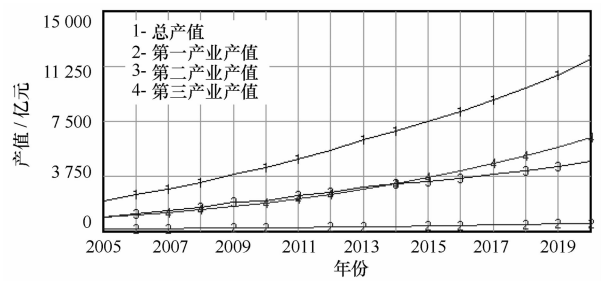

图 3 基础运行时的经济指标变化

大连市 2020 年总用水量将增加到 24.3 亿 m^3,已经占到多年平均水资源总量的 76%,水资源供需矛盾愈加凸显。各用水部门用水变化如图 4 所示,其中生活用水和工业用水增长明显,农业用水和城市绿地用水增幅较小。

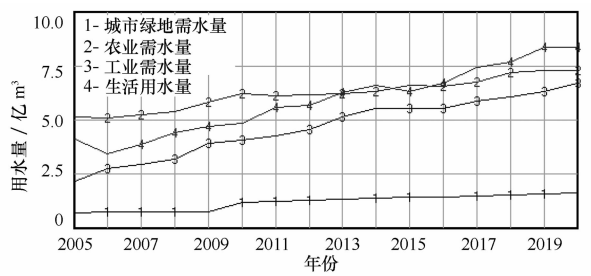

图 4 基础运行时的水资源指标

当环保投资占 GDP 比重取多年平均值 0.010 89 时,若按当前的环保投资力度,只有固体废物的排放量能得到有效控制,废水和废气排放量将不断上升,到 2020 年未经处理而排放的废水将达到 1.29 亿 t,废气将达到 18.4 万 t。由此带来的环境问题将非常严重,环境恶化将对人的生产生活带来很多负面影响。

3.2 情景分析

模型的建立是基于各种假设条件下才成立的,相对于预测来说,研究系统动力学模型中的动态行为关系才是建模的主要目的。选择灵敏

度较高的政策参数进行调控，产生不同的模拟情景，分析某个特定政策的作用。通过基础模拟，可以看出大连市当前的环保投资力度是不能满足未来的发展需求的，大连市的水资源供需矛盾也将越来越凸显，大连市可持续发展受环境污染和水资源供给制约。这里就逐步增加环保投资力度和不限制用水发展以及节约用水发展作为未来政策变量，进行情景分析。

3.2.1　环保投资的决策分析

从上面的基础模拟已经可以看出，按照当前的环保投资力度是不能够使大连市的环境达标的，尤其是废气和废水的治理。我国近年来虽然环保投资总额不断增加，而环保投资占 GDP 的比重却增加不明显，环保预算投入占 GDP 比重较低，为控制环境污染政府将计划加大环保投入。根据国际经验，为遏制环境恶化的趋势，必须保证使环境保护投资占当年本国 GDP 的 1%～1.5%；要使环境逐步改善，环保投资须占当年本国 GDP 的 2%～3%。因此，将模型中的环保投资占 GDP 比例从 0.010 89 分别增加到 0.012 5 和 0.015 进行情景模拟，得到相应的运行结果。

当环保投资占 GDP 比重为 0.012 5 时，如图 5 所示。因为固体废物的排放量在环保投资占 GDP 比重为 0.010 89 时的基础运行下已经得到了有效的控制，而且现实中城市的固体废物也相对比较容易集中处理，所以图中不再显示固体废物指标。结果显示，当环保投资比重增加到 0.012 5 时，废水排放量已经可以控制在 0.5 亿 t 以下，废气排放量先增加后减少，在 2013 年达到峰值 13.3 万 t，废气污染物虽在之后的时间上逐渐减少，但在此期间废气污染是很严重的。

当环保投资占 GDP 比重为 0.015 时如图 6 所示。废水排放量已经可以完全达到零排放，而废气排放量依旧是先增加后减少，在 2013 年达到峰值 5.3 万 t，但是废气排放量的增幅却相对比较平缓，而之后减少的趋势却非常明显，在 2016 年就可以达到废气的零排放。

增加环保投资投入的运行结果表明，加大环保投资力度，大连市的环境污染将会得到有效的控制。随着人口的增长和经济的发展，污染物势

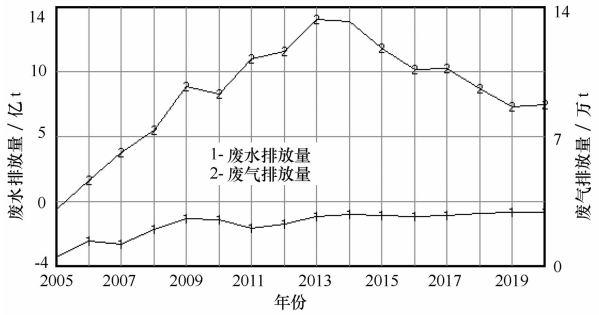

图 5　环保投资比重为 0.012 5 时环境指标变化

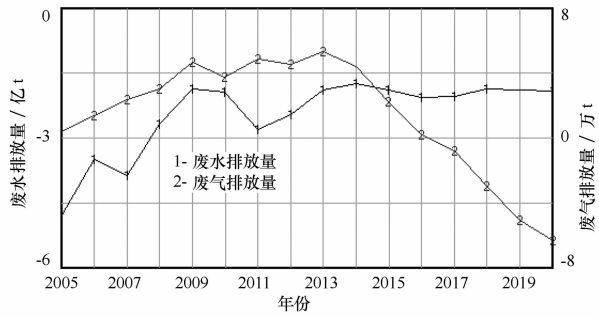

图 6　环保投资比重为 0.015 时环境指标变化

必会继续增加，以当前环保投资占 GDP 的比重已不能满足大连市的可持续发展要求，须尽快把环保投资比例提升到 1.5%，才能基本控制环境污染。而且模型中的环境数据仅是可统计到的，第三产业的废水废气、汽车尾气等很多难以统计的污染物排放也是环境污染的重要组成部分，所以模型中的零排放并不代表环境污染已完全治理。社会经济发展到一定阶段以后，居民的物质需求得到一定满足，对环境质量的要求就会越来越高，城市所采用的环境标准也会越来越严格，如近年对雾霾天气的倍加关注，政府也在空气质量标准中增加了 PM2.5 值检测，因此面对更高的环境质量要求也必须加大环保投资力度。对于大连市，模型中 1.5%的投资比例虽能满足需求，但实际上是不够的，经济快速发展所遗留下的环境问题需要更多治理资金，所以大连市环保投资比例应提高到 2%～3%，并力争达到 3%以上。

3.2.2　水资源供给情景分析

水资源模块参数将分别在不考虑水资源限制情况下和降低用水标准情况下进行模拟分析。当不考虑水资源限制情况时，经济发展加速，全

要素生产率调整为 7，农村人均用水量增加到 60 m^3，城市人均用水量增加到原来的 1.4 倍，单位耕地需水量增加的原来的 1.3 倍，单位绿地需水量增加到 0.008 亿 m^3/km^2。降低用水标准时，农村人均用水量增加到 50 m^3，城市人均用水量降低至原来的 0.8 倍，提高灌溉用水效率，单位耕地需水量降低到原来的 0.8 倍，提高工业用水效率，到 2020 年万元工业产值耗水降低为 11 m^3。调整水资源参数后各情况下总需水量运行结果如图 7 所示。

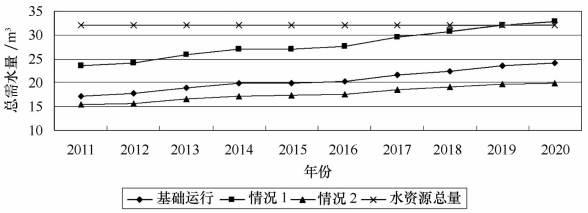

图 7 调整水资源参数后各情景下总需水量变化

图 7 中基础运行代表基础运行时总需水量，情况 1 为不考虑水资源限制情况下的总需水量，情况 2 为降低用水标准时的总需水量，水资源总量为多年平均值 32 亿 m^3。当不考虑水资源限制情况下发展时，总需水量一直高于基础运行时的总需水量 8 亿～13 亿 m^3，而且相距越来越大，到 2019 年时总需水量就已经超过多年平均水资源总量，水资源将会透支。而在降低用水标准后，总需水量明显低于基础运行时的总需水量，而且总需水量的增幅也相对较平缓，在 2020 年时总需水量达到 20 亿 m^3，在 10 年中只增加了 5 m^3，但从长远来看 32 亿 m^3 的水资源总量远远不够支撑大连市的可持续发展。

大连市的总供水中，地表水占到 70％以上，地下水占 20％左右，中水回用、海水淡化供水不到 10％。地下水超采，地下水位下降，导致海水入侵是一直困扰大连市的问题。解决水资源问题的方法基本上是开源和节流。受自然条件影响，大连市地表径流短小、狭窄，而且多为季节性河流，调蓄能力低，不利于地表水的集中利用。降水和径流在年内分布不均匀，而且也经常出现连续丰水年和连续枯水年，加大了水资源的开发利用难度。目前大连市已经基本建成现代化城市供水体系，境内河流水量控制利用已达 40％以上，水资源开发程度已经接近极限。基于以上分析开源的方法只能通过境外跨流域调水、中水回用和海水淡化 3 个方面实行。大连市已经建成了大伙房水库输水工程，引洋入连供水工程也在建设中，加快和完善调水工程建设能对大连市可持续发展提供有效帮助。从历史数据来看，中水回用和海水淡化供水虽然不足总供水的 10％，但是其水量和所占比重一直增加明显，这两种对策的水资源的开发潜力巨大，依靠技术和政策大力发展中水回收和海水淡化产业，对大连市可持续发展具有现实和战略意义。另外，大连市三面环海，部分产业可以直接利用海水进行生产活动，2010 年大连市工业取水中海水占了 34.55％，一些无需一定使用淡水的工业可以尽可能使用海水，也能缓解水资源供需矛盾。从节流方面来讲，提高各部门用水效率，形成节约型社会也是促进大连市可持续发展的必要措施。社会经济的高速发展所造成的水污染严重制约着水资源的可利用性，防治污染，提高水质将有效改善大连市的水资源短缺情况。

4 结束语

系统动力学是能借助计算机模拟达到定性和定量相结合地研究处理复杂系统问题的学科，其善于解决多变量、高阶次、多回路和非线性的复杂系统问题的特点有利于研究可持续发展问题。

文章基于 Vensim 软件构建的大连市可持续发展模型模拟结果表明：

(1)大连市的人口增长较慢，人口数量在控制范围之内；

(2)模拟中的经济增长落后于规划目标，为求经济快速发展，需要优化产业结构，在振兴老工业的基础上，注重技术创新大力发展新兴产业，提高居民收入水平和改善生活质量促进服务业发展；

(3)环境系统中以当前的环保投资力度是无法满足未来环境要求的，污染将愈来愈严重，必须加大环保投资力度，把环保投资占 GDP 比重提升到 1.5％能够基本控制污染，但要达到改善环境质量的目标就需要把环保投资比重提升到 2％～3％；

(4)大连市面临的水资源问题将会越来越严峻，到 2020 年总需水量占到多年平均水资源总量的 76%，其中工业需水和生活需水增幅最大，在不考虑水资源限制的情况下发展，水资源在 2019 年就会透支，而降低用水标准能明显缓解水资源供需矛盾，但从长远来看水资源问题依旧突出，大连市必须从开源、节流、提高水质量等多方面采取措施才能保证大连市的可持续发展。

参考文献

[1] 王其藩. 系统动力学[M].(2009 年修订版)北京：上海财经大学出版社，2009：1－195.

[2] SHEN Qiping，CHEN Qing，TANG Bosin，et al. A system dynamics model for the sustainable land use planning and development. [J]. Habitat International，2009，33(1)：15－25.

[3] 佟贺丰，曹燕，于洁，等. 基于系统动力学的城市可持续发展模型：以北京为例[J]. 发展研究，2010(12).

[4] 张子珩，濮励杰，周秀慧. 乌海市可持续发展的系统动力学模型仿真[J]. 干旱区资源与环境，2010(12)：55－60.

[5] 姚建，孙炳，彭艳，等. 基于系统动力学模型的区域可持续发展分析[J]. 资源开发与市场，2012，28(5)：405－478.

[6] 师满江，徐中民. 张掖市可持续发展系统动力学模拟分析[J]. 冰川冻土，2010(4).

[7] 李杰兰，陈兴鹏，王雨，等. 基于系统动力学的青海省可持续发展评价[J]. 资源科学，2009(9)：1624－1631.

[8] 程叶青，李同升，张平宇. SD 模型在区域可持续发展规划中的应用[J]. 系统工程理论与实践，2004(12)：13－18.

[9] 许光清，邹骥. 可持续发展与系统动力学[J]. 经济理论与经济管理，2005(1)：69－71.

[10] 宋世涛，魏一鸣，范英. 中国可持续发展问题的系统动力学研究进展[J]. 中国人口·资源与环境，2004，14(2)：42－48.

[11] 马国丰，陆居一. 国内外系统动力学研究综述[J]. 经济研究导刊，2013(6)：218－219.

[12] 孙才志，闫冬. 基于 DEA 模型的大连市水资源－社会经济可持续发展评价[J]. 水利经济，2008(7)：1－75.

[13] 范斐，孙才志，王雪妮. 社会、经济与资源环境复合系统协同进化模型的构建及应用：以大连市为例[J]. 系统工程理论与实践，2013(2)：41－419.

[14] 陈守煜，王国利，朱文彬，等. 大连市水资源、环境与经济协调可持续发展研究[J]. 水科学进展，2001(12)：50－508.

[15] 李颖，任学慧. 城市化背景下大连市可持续发展评价[J]. 资源开发与市场，2010，26(10)：892－916.

[16] 牟建华，刘乐，张彤. 基于生态足迹模型的沿海城市可持续发展分析[J]. 经济研究导刊，2010，33(11)：131－134.

[17] 李雪铭，姜斌，杨波. 城市人居环境可持续发展评价研究：以大连市为例[J]. 中国人口·资源与环境，2002，12(6)：129－131.

[18] 盖美，田成诗. 大连市海岸带经济与环境协调发展分析[J]. 经济地理，2002(3)：179－183.

[19] 董晓菲，韩增林. 基于可持续发展的大连市海滨浴场现状分析与对策研究[J]. 海洋开发与管理，2007，24(8)：67－71.

[20] 马静，李培蕾，曹永强. 基于生态足迹的区域生态环境 可持续发展研究：以大连市旅顺口区为例[J]. 水利发展研究，2012(2)：48－52.