

基于SD模型的城市水资源承载力动态仿真

—以佳木斯市为例

姜秋香^{1,2},董鹤¹,付强¹,王子龙^{1,2},纪毅¹,谢萌¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 农林经济管理博士后科研流动站, 哈尔滨 150030)

摘要:为解决城市水资源供需矛盾,提高城市水资源的可持续承载能力和实现社会经济的可持续发展,利用系统动力学方法,建立了佳木斯市水资源承载力动态仿真模型,并结合区域资源利用和社会经济发展特点,设计了现状延续、治污开源、限采节流和综合协调4种提高水资源承载力方案。方案仿真结果显示:现状延续、治污开源和限采节流三种方案在仿真年限内(2012年-2030年)未实现水资源供需平衡,水资源短缺问题仍将束缚佳木斯市工农业生产和社会经济发展;综合协调方案不仅在2015年保证了水资源供需动态平衡,而且实现了社会经济的快速发展,是提高佳木斯市水资源承载能力的最佳方案。

关键词:水资源;承载力;系统动力学;动态仿真;佳木斯市

中图分类号:TV213;F323.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2015)05-0827-05

Dynamic simulation of urban water resources carrying capacity based on system dynamic model

—A case study in Jiamusi City

JIANG Qiur xiang^{1,2}, DONG He¹, FU Qiang¹, WANG Zilong^{1,2}, JI Yi¹, XIE Meng¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Postdoctoral Mobile Research Station of Agricultural and Forestry Economy Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to resolve the contradiction between urban water resources supply and demand, to enhance the sustainable carrying capacity of urban water resources, and to realize the sustainable development of social economy, the system dynamics method was applied to build a dynamic simulation model of water resources carrying capacity in Jiamusi City. Based on the characteristics of regional resources utilization and socioeconomic development, four schemes were designed to enhance the water resources carrying capacity, including current situation continuation scheme, pollution control and increasing income scheme, limiting exploitation and decreasing expenditure scheme, and comprehensive coordination scheme. The simulation results showed that the balance between water resources supply and demand is not realized under the former three schemes from 2012 to 2030, and water resources shortage still restricts the industrial and agricultural production and socioeconomic development of Jiamusi City. However, the balance between water resources supply and demand in 2015 and rapidly socioeconomic development are realized under the comprehensive coordination scheme. Thus, the comprehensive coordination scheme is the best scheme to enhance the water resources carrying capacity of Jiamusi City.

Key words: water resources; carrying capacity; system dynamics; dynamic simulation; Jiamusi City

1 研究背景

水是构成环境的基本要素,是维系社会进步和人类发展的重要物质基础。水资源的可持续利用是实现生态环境健康和经济持续发展的基本支撑,处理好水资源开发利用和

社会经济发展以及生态环境保护之间的关系是坚持可持续发展道路的关键内容^[1]。随着工业化进程加快、人口过度膨胀、经济迅猛增长,各行业对水资源的需求量逐年增加,再加上水资源不合理开发利用、水环境污染日益严重,导致水资源对人口、社会、经济和生态的承载能力急剧下降^[2]。水资

收稿日期:2014-10-15 修回日期:2015-04-22 网络出版时间:2015-09-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150925.1024.002.html>

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目资助(面上)(12531009)

作者简介:姜秋香(1982),女,黑龙江佳木斯人,副教授,博士,主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail: jiangqiuixiang914@163.com

通讯作者:付强(1973),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail: fuqiang0629@126.com

源供需矛盾日益尖锐、承载能力降低,已成为严重制约我国社会经济可持续发展的瓶颈,是影响到国家安全的重大战略问题^[3-6]。因此,做好水资源承载力研究工作,实现水资源可持续利用,对社会、经济的可持续发展、生态环境的良性循环均具有重要意义。

佳木斯市位于黑龙江、松花江和乌苏里江三江交汇处的三江平原西南部、黑龙江省东北部,是我国重要的粮食生产基地,也是黑龙江省重要的交通枢纽城市。佳木斯市和中国许多城市一样,存在着地表水资源利用率低^[7]、地下水资源超采^[8]、水资源浪费和污染严重^[9]、水资源供需矛盾日益加剧等诸多水资源问题,已经严重影响了佳木斯市的城市发展。本文以可持续发展为指导思想,遵循有效性和可持续性原则,构建基于系统动力学(System Dynamics,简称SD)的水资源承载力动态仿真模型;同时,以解决佳木斯市水资源利用现存问题为目标,结合区域水资源利用和社会经济发展现状,设计提高水资源承载能力方案;通过对方案的动态仿真,提出实现佳木斯市水资源供需平衡和可持续利用的最佳方案,为区域水资源可持续利用和社会经济的可持续发展提供政策参考。

2 系统动力学建模方法

系统动力学是由美国麻省理工学院 Jay. W. Forrester 教授于 1956 年提出的,是系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统信息反馈结构与行为的一门科学^[10]。系统动力学既可对现行政策跟踪,实现科学管理,又可对新的发展战略和各种调控策略仿真模拟,供决策者参考,是一种不需要在真实系统上试验从而节省人力、物力、财力和时间的科学方法。20 世纪 80 年代以来,系统动力学已逐渐成为现代科学决策和预测的有效工具,现已被广泛地应用于自然科学、社会科学和工程技术等领域。

利用系统动力学方法建立模型,首先要明确建模目的和系统边界;然后根据系统的运行特点,确定系统内部的主要参变量,梳理系统因果反馈关系,建立系统动态仿真模型及有效性检验;最后进行系统动态仿真,在分析和评价仿真

结果的基础上,确定最优决策方案。系统动力学的建模过程见图 1。

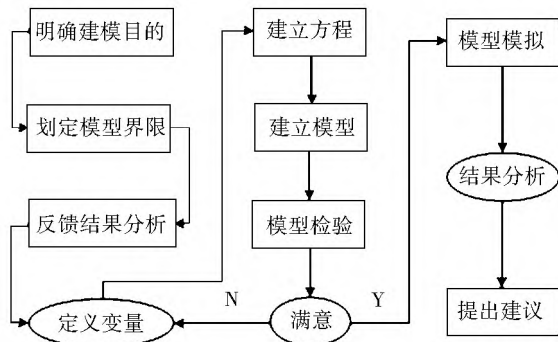


图 1 系统动力学建模步骤

Fig. 1 Flowchart of system dynamics model

3 水资源承载力动态仿真模型的构建

3.1 模型边界和数据来源

佳木斯市水资源承载力动态仿真模型以佳木斯市的行政边界为系统空间研究边界。模型的时间边界为 2000 年-2030 年,其中 2011 年为现状水平年,2000 年-2011 年为历史统计数据年,2012 年-2030 年为模型仿真预测年,其中 2012 年-2015 年为近期规划水平年,2016 年-2020 年为中期规划水平年,2021 年-2030 年为远期规划水平年。为了减少时间步长所带来的误差,确定模型仿真时间间隔为 1 年。

研究数据来源于《黑龙江省统计年鉴》^[11]、《佳木斯经济统计年鉴》^[12]和《黑龙江省地方标准用水定额》^[13]。

3.2 模型的构建

在剖析佳木斯市水资源系统及其各要素反馈机制的基础上,遵循实用性、问题导向性、系统性的原则^[14],确定变量及其因果反馈机制,量化变量结构方程式,用系统动力学软件 Vensim PLE 5.8 完成水资源承载力动态仿真模型的构建(图 2)。该模型包含水资源供需、社会需水、农业需水、工业需水、生态需水和国民经济等 6 个子系统的 67 个变量。

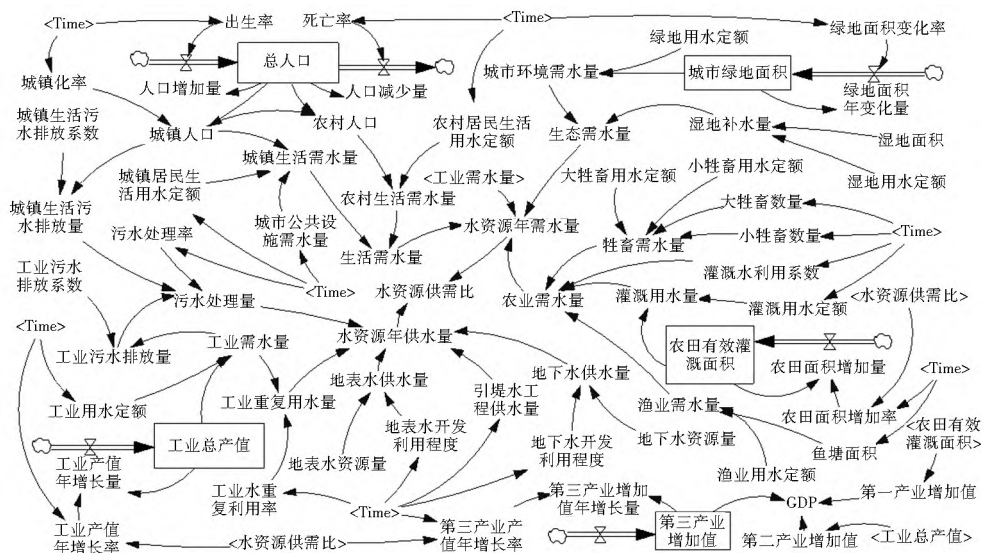


图 2 佳木斯市水资源承载力动态仿真模型

Fig. 2 Dynamic simulation model of water resources carrying capacity in Jiamusi City

3.3 模型的灵敏度分析

模型的灵敏度分析就是分析模型中参数改变后对模型运行的影响程度,将对模型影响较大的参数视为敏感参数^[5],在一定范围内调整敏感参数,可实现水资源供需平衡和提高水资源承载能力的目的。

通过对佳木斯市水资源承载力动态仿真模型灵敏度分析,排除部分不属于政策可调控范畴以及对水资源供需结构影响较小的参数,最终确定该模型敏感参数包括:引提水工程供水量、工业水重复利用率、污水处理率、地下水开发利用程度、地表水开发利用程度、灌溉用水定额、工业用水定额、灌溉水利用系数等8个敏感参数。

4 水资源承载力方案动态仿真及优选

4.1 方案的设计

本研究以解决佳木斯市水资源开发利用存在问题为目标,在对水资源承载力动态仿真模型的建模目的、敏感参数、系统结构和因果关系剖析的基础上,设计了4种提高水资源承载能力的方案:现状延续方案、治污开源方案、限采节流方案和综合协调方案。将8个敏感参数作为各方案的调控指标,各方案的具体调控策略如下。

(1) 现状延续方案。8个敏感参数均沿用现状年(2011年)水平。

(2) 治污开源方案。以提高佳木斯市水资源供给能力和污水处理能力为主要目的。调控的敏感参数包括:工业水重复利用率、引提水工程供水量、污水处理率和地表水开发利用程度。参考经济发达国家和地区工业、生活污水处理和再利用能力,结合佳木斯市中长期水利和社会经济发展规划,设定治污开源方案中敏感参数在不同时期的年变化率(见表1)。

(3) 限采节流方案。以限制佳木斯市地下水开采力度、提高工农业节水能力为主要目的。调控的敏感参数包括:地下水开发利用程度、工业用水定额、灌溉用水定额和灌溉水利用系数。参考经济发达国家和地区的工农业生产节水程度,结合佳木斯市中长期水利和社会经济发展规划,设定限采节流方案中敏感参数在不同时期的年变化率(见表1)。

(4) 综合协调方案。治污开源方案和限采节流方案均从最大程度地提高供水或降低需水的角度进行敏感参数设计,存在着一定的经济不适用和不能保证资源的永续利用隐患。鉴于此,在治污开源和限采节流方案基础上,放缓引提水工程建设步伐、降低工农业节水程度等措施,适当调整部分敏感参数的变化速率,完成对综合协调方案敏感参数的设计(见表1)。

表1 水资源承载力方案调控策略

Tab. 1 Scheme regulating strategies of water resources carrying capacity

敏感参数	2011年 敏感参数值	敏感参数年变化率(%)								
		治污开源方案			限采节流方案			综合协调方案		
		近期	中期	远期	近期	中期	远期	近期	中期	远期
引提水工程供水量/ 10^8 m^3	33 198	50	15	1.5	0	0	0	50	0	0
地表水开发利用程度	0.46	2.5	2	1.5	0	0	0	2.5	0	0
工业水重复利用率	0.40	3	2.5	2	0	0	0	3	2.5	2
污水处理率	0.038	20	15	10	0	0	0	20	15	10
地下水开发利用程度	0.84	0	0	0	-2	-0.5	0	-2	-1.5	-1
工业用水定额/ $(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	143	0	0	0	-5	-4.5	-4	-5	-4	-3
灌溉用水定额/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	4627	0	0	0	-6	-5.5	-4.5	-6	-5.5	-4.5
灌溉水利用系数	0.58	0	0	0	2	1.5	1	2	1	0.5

4.2 方案的动态仿真

分别将上述4种水资源承载力方案的敏感参数调控值输入Vensim软件中,运行水资源承载力动态仿真模型,实现不同方案下水资源承载力动态仿真。为了便于方案的比较,本研究分别进行不同方案下水资源年供水量、年需水量、供需平衡和地区生产总值的动态仿真(见图3-图6)。

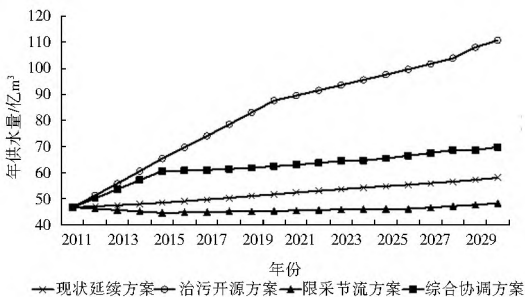


图3 水资源年供水量动态仿真

Fig. 3 Dynamic simulation of annual water supply

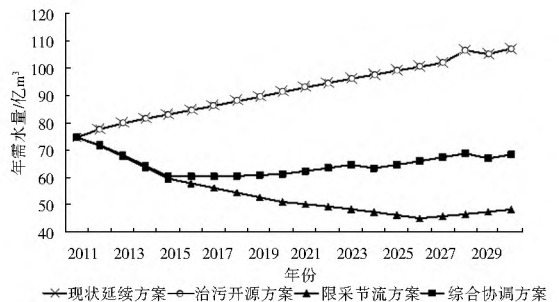


图4 水资源年需水量动态仿真

Fig. 4 Dynamic simulation of annual water demand

4.2.1 水资源年供水量动态仿真

由不同方案下水资源年供水量动态仿真结果可知(图3):治污开源方案水资源年供水量增幅最大,2030年水资源年供水量可达110.8亿 m^3 ,为四种方案中最大;综合协调方案水资源年供水量变化幅度低于治污开源方案,2030年水资

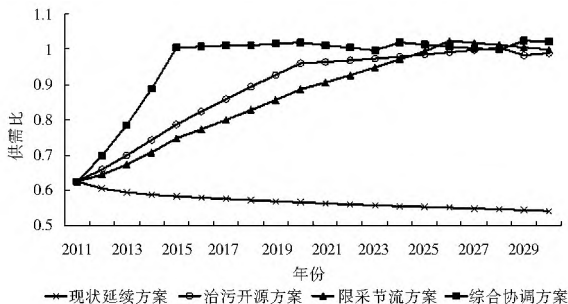


图 5 水资源供需比动态仿真

Fig. 5 Dynamic simulation of water resources supply and demand ratio

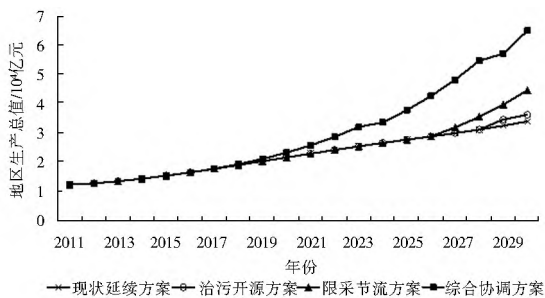


图 6 地区生产总值动态仿真

Fig. 6 Dynamic simulation of regional GDP

源年供水量为 69.8 亿 m^3 , 处于四种方案的中等水平; 现状延续方案水资源年供水量增幅缓慢, 至 2030 年水资源年供水量仅为 57.9 亿 m^3 , 与 2011 年 (46.6 亿 m^3) 相比仅增加 24.2%; 由于限制地下水的开采, 限采节流方案水资源年供水量变化幅度为四种方案的最低, 2030 年年供水量仅为 48.2 亿 m^3 。

4.2.2 水资源年需水量动态仿真

由不同方案下水资源年需水量动态仿真结果可知 (图 4): 由于治污开源方案和现状延续方案工业需水量、农业需水量、生活需水量和生态需水量变化相同, 因此其水资源年需水量均表现出逐年递增的变化趋势, 至 2030 年水资源年需水量均达到四种方案的最大值 (107.2 亿 m^3), 与 2011 年 (74.7 亿 m^3) 相比增加 43.5%; 由于限采节流方案对工业生产和农业灌溉采取了节水措施, 因此, 其水资源年需水量呈逐年递减的趋势, 2030 年水资源年需水量 (48.2 亿 m^3), 为四种方案的最低值; 综合协调方案水资源年需水量介于治污开源方案和限采节流方案之间, 由于该方案从 2015 年开始降低工农业生产节水力度, 导致水资源年需水量动态仿真呈现先减少后缓慢增加的变化趋势。

4.2.3 水资源供需平衡动态仿真

水资源供需比是评价水资源是否实现供需平衡的唯一指标, 同时也是衡量水资源对工农业生产和社会经济发展承载能力的重要指标^[16,17]。供需比大于 1 时, 虽然实现了供需平衡, 但存在余水量, 易造成水资源的浪费, 此时水资源潜在承载能力较强; 供需比小于 1 时, 供水能力无法满足生活、生产和生态对水资源的需求, 水资源承载能力较弱; 供需比等于 1 时, 水资源供需平衡达到最佳状态, 既未造成水资源的浪费, 同时也满足了用水部门对水资源的需求, 但这只是理想状态。由于水资源的供水结构、需水结构和水资源供需比

之间存在着复杂的反馈关系, 所以很难维持供需平衡的最佳状态 (供需比等于 1) 而不改变。事实上, 最佳的供需平衡状态多出现在供需比在 1 上下浮动的时段, 可称之为水资源供需动态平衡。

由不同方案下水资源供需比动态仿真结果可知 (图 5): 现状延续方案供需比表现为逐年减小的趋势, 在仿真年限内水资源不但未实现供需平衡, 而且供需矛盾仍在逐年加剧, 水资源承载力逐年下降; 治污开源方案供需比表现为逐年增加的趋势, 水资源承载力逐年增加, 但在仿真年限内仅 2026 年供需比大于 1, 其他规划水平年均未实现供需平衡; 限采节流方案供需比也表现为逐年增大的趋势, 2025 年以后实现了供需平衡, 水资源承载力逐年增大; 综合协调方案供需比为先增大后趋于稳定, 在 2015 年实现了供需平衡, 而后水资源供需比在 1 上下波动, 处于供需动态平衡。

4.2.4 地区生产总值动态仿真

地区生产总值是一个区域经济发展程度最重要的评价指标。在现状水平年 2011 年, 佳木斯市经济发展水平较低, 人均地区生产总值为 2.2 万元, 远低于同期全国人均地区生产总值 3.5 万元, 未来在水资源优化利用和产业结构调整的前提下, 佳木斯市经济将有较大的提升空间。

由不同方案地区生产总值动态仿真结果可知 (图 6), 4 种方案的地区生产总值均呈现逐年递增的趋势, 但是综合协调方案地区生产总值增加幅度最大, 限采节流方案增加幅度次大, 现状延续方案增加幅度最小。从 2016 年开始, 综合协调方案地区生产总值已明显高于其他三种方案, 至 2030 年该方案的地区生产总值与 2011 年相比已增加 4 倍多。

5 结语

本文以可持续发展为指导思想, 以资源-社会-经济-生态和谐发展为基本原则, 建立了佳木斯市水资源承载力动态仿真模型。以实现佳木斯市水资源供需平衡、提高水资源承载能力为主要目标, 设计了提高水资源承载力的四种方案。通过方案比较, 发现综合协调方案不仅在近期规划水平年内 (2015 年) 实现了水资源的供需动态平衡, 同时水资源所承载的地区生产总值远高于其他三种方案。即该方案在满足工农业生产和社会经济发展对水资源的需求的同时, 加快了社会经济的发展速度, 持续提升了佳木斯市水资源承载的经济发展能力, 实现了水资源可持续利用和社会经济可持续发展目标。因此, 最终确定综合协调方案为实现佳木斯市水资源供需平衡、提高水资源承载能力的最佳方案。鉴于此, 佳木斯市可通过积极开发利用地表水资源的同时, 加强对地下水开采的管理、提高污水处理能力、加大工农业节水力度, 以实现水资源的永续利用和提高社会经济发展速度。

参考文献 (References):

- [1] 魏传江, 韩俊山, 韩素华. 流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (WEI Chuan jiang, HAN Jun shan, HAN Su hua. Key Technology and Demonstration of Total Factor Optimal Allocation to Basin & Region Water Resources [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))

- [2] 姚治君, 王建华, 江东, 等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 111-115. (YAO Zhi jun, WANG Jiar hua, JIANG Dong, et al. Advances in study on regional water resources carrying capacity and research on its theory[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 111-115. (in Chinese))
- [3] 康绍忠, 蔡焕杰, 冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 1-6. (KANG Sha o zhong, CAI Huan jie, FENG Sha o yuan. Technique innovation and research fields of modern agricultural and ecological water saving in the future[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 1-6. (in Chinese))
- [4] C J van Leeuwen. City Blueprints: Baseline Assessments of Sustainable Water Management in 11 Cities of the Future[J]. Water Resources Management, 2013, 27(15): 5191-5206.
- [5] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269. (XIA Jun, ZHU Yi Zhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269. (in Chinese))
- [6] 童玉芬. 北京市水资源人口承载力的动态模拟与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 42-47. (TONG Yu fen. Dynamic simulation and analysis to population carrying capacity of Beijing[J]. China Population Resources and Environment, 2010, 20(9): 42-47. (in Chinese))
- [7] 姜秋香, 付强, 王子龙, 等. 三江平原水土资源空间匹配格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 270-277. (JIANG Qiu xiang, FU Qiang, WANG Zi long, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 270-277. (in Chinese))
- [8] 孙思淼, 戴长雷, 郭微微. 佳木斯市控制性需水总量预测与分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(1): 21-26. (SUN Si miao, DAI Chang lei, GU O Wei wei. Prediction and analysis on total controlled water demand in Jiamusi[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(1): 21-26. (in Chinese))
- [9] 李春鸿. 佳木斯市“十二五”期间水资源供需预测及平衡分析[J]. 黑龙江科技信息, 2012(22): 261. (LIU Chun hong. Balance analysis and forecast on water resources supply and demand in Jiamusi City during the 12th Five Year[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(22): 261. (in Chinese))
- [10] Forrester Jay W. System dynamics and its use in understanding urban and regional development[J]. Journal of Shanghai institute of mechanical engineering, 1987, 14(4): 95-106.
- [11] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2012. (Heilongjiang Provincial Bureau of Statistics. Statistical yearbook of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001-2012. (in Chinese))
- [12] 佳木斯市统计局. 佳木斯经济统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2012. (Jiamusi Bureau of Statistics. Economy Statistical Yearbook of Jiamusi[M]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001-2012. (in Chinese))
- [13] DB23/T 727-2009, 黑龙江省地方标准用水定额[S]. (DB23/T 727-2009. The Local Standard for Water Consumption Norm in Heilongjiang Province[S]. (in Chinese))
- [14] 蔡林. 系统动力学在可持续发展研究中的应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. (CAI Lin. The Application of System Dynamics in The Research of sustainable development [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2008. (in Chinese))
- [15] E assanzadeh, M Zarghami, Y Hassanzadeh. Determining the Main Factors in Declining the Urmia Lake Level by Using System Dynamics Modeling[J]. Water Resources Management, 2012, 26(1): 129-145.
- [16] 江明锋, 马太玲, 孙晶. 呼和浩特市水环境承载力综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(9): 60-63. (JIANG Ming feng, MA Tai ling, SUN Jing. Comprehensive evaluation on water environment carrying capacity of Hohhot[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(9): 60-63. (in Chinese))
- [17] 何仁伟, 刘邵权, 刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力—以贵州省毕节地区为例[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1376-1382. (HE Ren wei, LIU Sha o quan, LIU Yun wei. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in karst region of Southwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(11): 1376-1382. (in Chinese))