

# 基于系统动力学的龙口市水资源供需问题研究

秦欢欢<sup>1</sup>, 张保祥<sup>2</sup>, 孟凡海<sup>3</sup>

(1. 东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013;  
2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 3. 山东省龙口市水务局, 山东 龙口 265701)

**摘要:** 为了研究山东省沿海发达城市龙口市的水资源供需问题, 运用系统动力学方法, 构建了龙口市水资源系统动力学模型, 并设计4种发展情景模拟2009-2030年龙口市水资源需求水平, 选取总需水量、缺水量、工业GDP、第三产业GDP和COD排放总量作为指标来评价龙口市的水资源供需状况。结果表明: 龙口市水资源在未来无法满足社会经济发展的需求, 无论采取何种发展情景, 龙口市在未来年份不能够彻底解决缺水的问题, 情景3(可持续发展型情景)可以有效缓解龙口市缺水的问题。在此基础上, 提出了龙口市维持社会经济和水资源可持续发展的对策, 即加强发展科学技术, 综合考虑经济发展、水资源的开源和节流、产业结构调整及水环境控制和保护。

**关键词:** 水资源供需; 系统动力学; 可持续发展; 龙口市

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0045-05

## Study on water supply and demand of Longkou city based on system dynamics

QIN Huanhuan<sup>1</sup>, ZHANG Baoxiang<sup>2</sup>, MENG Fanhai<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, School of Water Resources and Environmental Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 3. Longkou Water Bureau, Longkou 265701, China)

**Abstract:** In order to study the water supply and demand in Longkou City, a coastal developed city in Shandong province, the System Dynamics (SD) approach is applied to develop a SD model of water supply and demand for the area. Four development scenarios has been designed to simulate the water demands of Longkou from 2009 to 2030. Total water demand, water deficit, industrial GDP, tertiary industrial GDP and COD emission were selected as the indexes to evaluate the water supply and demand situation of Longkou. The results show that the water resources of Longkou can not meet the needs of social economic development in the future. No matter what development scenario is adopted, the water deficit problem of Longkou will not be completely solved in future years. Scenario 3 (sustainable development scenario) can effectively alleviate the water deficit problem in Longkou. Based on these results and analysis, the countermeasures were put forward to maintain the sustainable development of social economy and water resources, namely, full use of science and technology, and comprehensively consider of economic development, "exploit new resources and conserve existing resources" of water resources, adjustment of industrial structure, and water environment control and protection.

**Key words:** water resource supply and demand; system dynamics; sustainable development; Longkou city

## 1 研究背景

随着社会经济的发展和人口的增长, 水资源浪费和污染问题呈现严重发展态势, 缺水问题将严重制约21世纪经济和社会的发展, 并可能导致国家间

的冲突<sup>[1-2]</sup>。据统计, 全球城市生活用水量到2050年就相当于目前的全球用水量, 全球55%的人口将面临水危机。目前我国668个建制市中缺水城市达400多个, 严重缺水的有130多个<sup>[3]</sup>, 水资源供需矛盾已成为阻碍我国经济健康稳定发展的主要原因之

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-05-12

基金项目: 东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地开放基金项目(NRE1516); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2016104)

作者简介: 秦欢欢(1986-), 男, 江西南昌人, 博士, 讲师, 主要研究方向为水资源利用与管理。

—<sup>[4]</sup>。龙口市地处山东省沿海经济发达区,多年平均水资源总量为  $1.756 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,人均水资源占有量为  $386 \text{ m}^3$ ,人均淡水资源不足全国平均的  $1/3$ ,属于严重缺水地区<sup>[5]</sup>。龙口市水资源开发利用中存在的问题主要有水资源短缺、浪费,过度开发导致水生态环境恶化,小型水利工程年久失修、老化严重,水资源管理力度不够等<sup>[6]</sup>,水资源的利用远远跟不上社会经济快速发展的要求,严重制约了当地社会经济发展和人民生活水平的提高。

系统动力学(System Dynamics,简称SD)是麻省理工学院的福瑞斯特(Forrester J W)<sup>[7-8]</sup>于1958年为分析生产管理及库存管理等企业问题而提出的系统仿真方法。它是基于系统行为与内在机制间相互紧密的依赖关系,透过数学模型的建立与分析过程而获得,并逐步发掘出产生变化形态的因果关系。它以反馈控制理论为基础,以数学计算机仿真技术为手段,研究复杂系统的行为,在处理高度非线性、高阶次、多变量、多重反馈问题方面具有优势<sup>[9-10]</sup>。随着系统动力学理论和方法的不断发展与完善,以及计算机技术的改进,这种方法已经在很多领域得到应用,如城市规划<sup>[11]</sup>、生态环境规划<sup>[12]</sup>、土地承载力<sup>[13-14]</sup>、水资源管理与利用<sup>[2,15-21]</sup>等。水资源系统是社会-经济-自然可持续发展的信息反馈系统之一,内部各影响因素间的关系较为复杂,用SD可以简明地反映各因素间的本质联系,真实有效地组织和揭示非线性复杂系统内部各因素之间及因素内部的相互反馈机制<sup>[22-23]</sup>。因此,采用SD方法来研究亟待解决的水资源问题,可为水资源科学决策提供可靠依据,有利于实现我国环境和经济的可持续发展。

龙口市地处胶东半岛北部,东经  $120^\circ 13' 14'' \sim 120^\circ 44' 46''$ ,北纬  $37^\circ 27' 30'' \sim 37^\circ 47' 24''$ ,西部、北部濒临渤海,陆地面积  $893.32 \text{ km}^2$ (含岛屿),海岸线总长度  $68.38 \text{ km}$ (含岛屿)。截止2010年,龙口市总人口  $63.83 \times 10^4$ 人,地区生产总值  $680 \times 10^8$ 元,居山东省县域经济第1位。龙口市属暖温带半湿润季风型大陆性气候,四季分明,季风进退明显。多年平均降水量  $586.3 \text{ mm}$ ,降水量年内分配不均,72.9%集中在6-9月份;降水量年际变化大,最大降水量(1964年)为  $1046.2 \text{ mm}$ ,最小(1989年)仅为  $329.4 \text{ mm}$ ;降水地域分布不均,南部山区降水量较大,北部平原区降水量较小。该市水资源具有总量少、地域分布不均、年际变化大、丰枯连续的特点。

本文以龙口市为研究区域,通过构建龙口市水

资源系统动力学模型,采用情景分析的方法,针对龙口市社会经济发展过程中出现的水资源问题进行预测研究,分析评价不同发展情景下龙口市未来水资源可持续利用的状况,据此提出可以缓解龙口市水资源供需矛盾的发展方案,为政府的决策者提供科学的依据和参考。

## 2 龙口市水资源系统动力学模型构建

### 2.1 模型结构和系统流图

模型的研究区是山东省龙口市,包括其所辖的13个镇,模拟年限是2000-2030年,基准年是2000年,时间步长是1a。本文采用SD专用建模软件VENSIM建立了包含人口、农业、工业及第三产业、水环境、水资源5个子系统的龙口市水资源系统动力学流图(图1),各子系统相互联系、相互影响。

(1)人口子系统。总人口由城镇人口和农村人口组成,受出生率和死亡率(即人口自然增长率)及缺水指数影响,总人口对总需水量及缺水量有反馈作用。总人口初始值取基准年的值  $62.31 \times 10^4$ (表1)。

(2)工业和第三产业子系统。该系统的状态变量是工业GDP和第三产业GDP,它们受到各自GDP增长率和缺水指数的影响,也对总需水量及缺水量产生反馈作用。

(3)农业子系统。农业是龙口市用水中重要的组成部分,该子系统主要变量包括有效灌溉面积、大小牲畜存栏数和农业GDP。缺水指数对这些变量起负反馈作用。由于龙口市农业经济比较发达,故在模型中考虑农业GDP,通过农业需水量来计算万元农业GDP用水量,进一步可获知农业用水的情况。

(4)水资源子系统。该子系统中,地表和地下水资源量是最重要的变量,地下水实际使用量和地下水开采率有直接关系。

(5)水环境子系统。该子系统中,将COD排放量作为衡量环境好坏的指标。COD排放量取决于COD产生量,而COD产生量由生活COD产生量和工业COD产生量组成,后两者与人口及工业规模有密切的关系。

### 2.2 模型的有效性检验

系统动力学以定性分析为先导,定量分析为支持,螺旋上升、逐步深化地研究解决问题。它要求在建模过程中必须紧密结合实际,深入调查研究,最大限度地收集与运用有关该系统及其问题的资料和统计数据<sup>[4]</sup>。在系统动力学建模过程中进行的有效性检验主要是历史检验,即将历史参数输入到模型

经运行后得到仿真结果,与实际发生的行为数据进行比较,验证其吻合程度,为模型行为模拟的可靠性和准确性做出判断。本次检验项目为人口子系统、经济子系统(工业、农业和第三产业)、环境子系统与资源子系统。被检验的变量有总人口、工业 GDP、工业用水量、工业废水排放量、水资源需求总

量等。经检验模型模拟结果与历史发展结果基本吻合,误差均未超过 10%,可以认为模型基本符合研究系统。表 2 列出了总人口的历史性检验,从表 2 可以看出,相对误差均小于 2%,说明模拟结果和人口历史发展比较符合,模型的参数可以运用于模型的预测阶段。

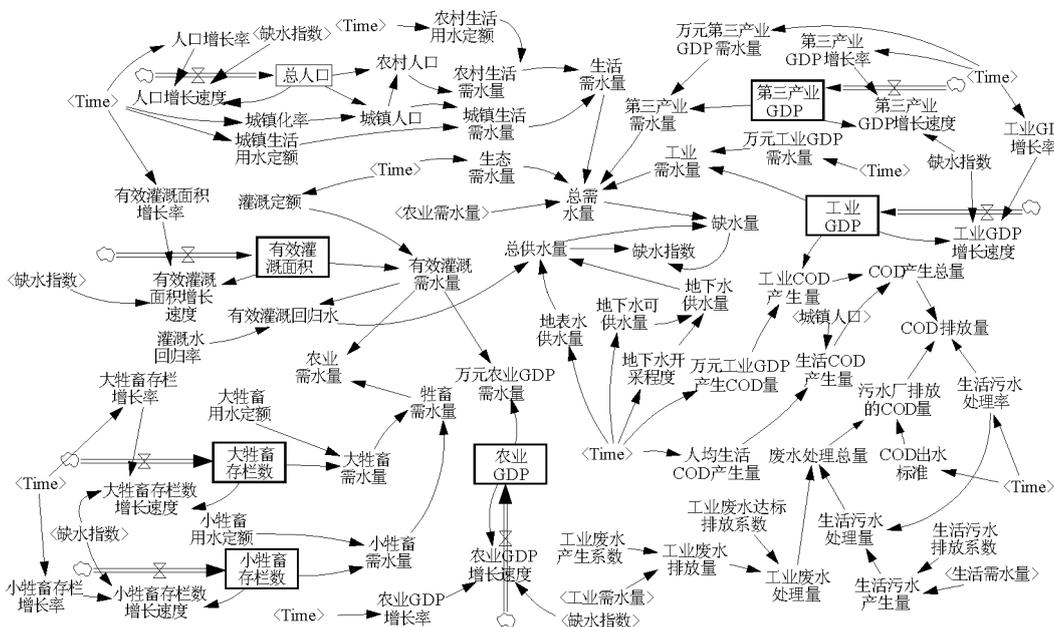


图 1 龙口市水资源系统动力学流程图

表 1 主要变量初始值

总人口/ 10 <sup>4</sup> 人	有效灌溉 面积/hm <sup>2</sup>	大牲畜 存栏数/头	小牲畜存栏 数量/10 <sup>4</sup> 头	农业 GDP/ 10 <sup>8</sup> 元	工业 GDP/ 10 <sup>8</sup> 元	第三产业 GDP/10 <sup>8</sup> 元
62.31	26510.00	7791.00	13.69	12.83	68.20	38.40

### 3 模拟情景设计

为了比较在不同发展情景下龙口市水资源的供需平衡状况,本文选取城镇化率、工业 GDP 增长率、万元工业 GDP 用水量、第三产业 GDP 增长率、万元第三产业 GDP 用水量、灌溉定额、生活污水处理率、人均生活 COD 产生量等变量为决策变量。通过决策变量的不同取值,设计 4 种不同发展情景。

#### 3.1 情景 0

趋势保持型情景。假设龙口市的发展政策及系统结构不发生大的调整,城市人口、社会经济发展速度没有太大的变化。工业 GDP 增长率在 2010、2020 和 2030 年分别为 16%、12% 和 8%,第三产业 GDP 增长率在 2010、2020 和 2030 年分别为 11%、10% 和 8%,城镇化率在 2010、2020 和 2030 年分别为 45%、

52% 和 55%。

表 2 总人口数历史检验

年份	总人口数 实际值/10 <sup>4</sup>	模拟运行值 10 <sup>4</sup>	相对误差/ %
2000	62.31	62.31	0.00
2001	62.46	62.61	0.24
2002	62.62	62.91	0.46
2003	62.58	63.20	0.99
2004	62.82	63.48	1.05
2005	63.08	63.75	1.06
2006	63.25	64.02	1.22
2007	63.44	64.27	1.31
2008	63.38	64.52	1.80

#### 3.2 情景 1

经济发展型情景。假设在当前和今后相当长的

一段时间内,发展经济仍是龙口市的重中之重。为此,把2010、2020和2030年工业GDP增长率分别提高到18%、16%和12%,第三产业GDP增长率在2010、2020和2030年分别提高为13%、12%和11%,城市化水平在2030年提高到62%,其它参数与情景0相同。

### 3.3 情景2

资源保护型情景。假设将水资源保护列为重点,万元工业GDP用水量在2010、2020和2030年分别为18、10和8 m<sup>3</sup>,万元第三产业GDP用水量在2010、2020和2030年分别为2.0、1.5和1.0 m<sup>3</sup>,人均生活COD产生量在2010、2020和2030年分别为0.0088、0.0082和0.0078 t。

### 3.4 情景3

可持续发展型情景。它既强调经济的发展,也注意对水资源的保护。生活污水处理率在2010、2020和2030年分别为90%、94%和97%,人均生活COD产生量在2030年降低为0.0078 t,万元工业GDP产生COD量在2030年降低为0.00045 t,城镇化率在2030年达到57%,工业GDP增长率在2020和2030年分别为13%和11%,第三产业GDP增长率在2030年降为10%,农作物灌溉定额在2030年降为1425 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

## 4 模拟结果分析

在4种情景模拟结果的基础上,从总需水量、缺水水量、经济发展目标以及环境保护这4方面对龙口市未来的水资源供需及社会经济状况进行分析,比较各个情景的模拟结果,从可持续发展的角度选出最符合研究区的发展情景,为龙口市未来社会经济的发展提供科学的政策建议。

从总需水量的角度来看,现有状况(情景0)下2030年总需水量为4.55 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>(图2),而经济发展型情景(情景1)、水资源保护型情景(情景2)和可持续发展型情景(情景3)2030年总需水量分别

为7.93 × 10<sup>8</sup>、4.12 × 10<sup>8</sup>和4.87 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。总需水量随时间递增,情景1的总需水量最大,情景0和情景3次之,情景2最小。在未来,无论采取什么情景,要使得经济继续发展,总需水量都会随着经济的发展而不断增加。

从缺水量的角度来看,4种情景下2030年缺水水量分别为2.92 × 10<sup>8</sup>、6.34 × 10<sup>8</sup>、2.54 × 10<sup>8</sup>和3.29 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,其中情景1最多,情景0和情景3次之,情景2最少。

4种情景在模拟末期都会缺水(图3),在现有条件下可持续型发展型情景由于既考虑了经济发展,又考虑了水资源保护,缺水水量只在后期5年(2026-2030年)比现有情景(情景0)多,其余年份都比情景0少。同时,情景2虽然缺水水量最少,但经济发展也受到很大限制。在大力发展经济的宏观背景下,这样的情景显然不会被决策者采纳。

在不同的发展情景下,研究区的经济发展状况也有所不同。4种情景下2030年的工业GDP分别为40.58 × 10<sup>6</sup>、77.28 × 10<sup>6</sup>、40.77 × 10<sup>6</sup>和49.99 × 10<sup>6</sup>万元,第三产业GDP分别为8.47 × 10<sup>6</sup>、13.27 × 10<sup>6</sup>、8.50 × 10<sup>6</sup>和10.98 × 10<sup>6</sup>万元,这两者表现出类似的趋势:情景1 > 情景3 > 情景2 > 情景0。作为山东省的沿海经济发达城市,龙口市的经济发展既不能太快以至于超出水资源的承载能力,亦不能只强调保护水资源而舍弃经济的发展,因此,需要保证社会经济发展与资源保护的均衡,采取类似于情景3这样的方案可以做到这一点。

4种情景的侧重点不同,COD排放量也不同(图4)。情景1由于过分强调经济的发展,COD排放量最多;情景3在发展经济的同时也注重了环境保护,COD排放量最少(只在最后3年比情景0多),可以控制在很低的范围内。COD排放量可以作为环境好坏的一个衡量标准,由此可见,情景3既注重经济发展,也注重保护环境,可以很好地协调经济发展与水资源及环境保护之间的关系。

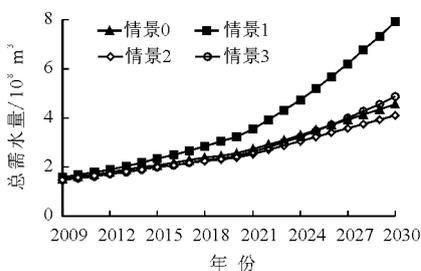


图2 4种情景下总需水量时间序列

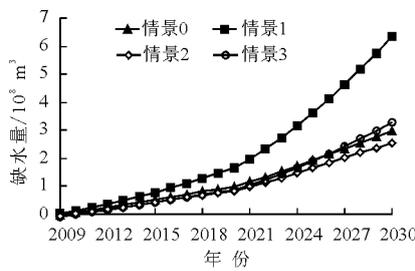


图3 4种情景下缺水水量时间序列

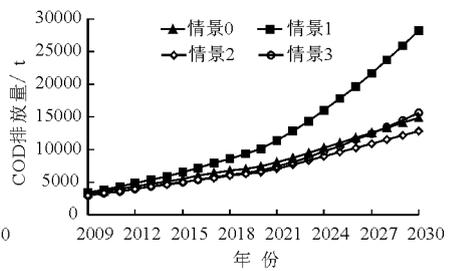


图4 4种情景下COD排放量时间序列

可持续型发展情景(情景3)在用水量、缺水量及COD排放量方面都是4种情景中最优的,该情景是龙口市未来发展的优先选择。过分强调经济的发展(情景1)、过分强调水资源保护的发展(情景2)或者保持目前的趋势(情景0),势必在水资源使用和经济发展之间失衡。只有保持经济发展与水资源保护的平衡,社会才能可持续地发展下去。在情景3下发展,龙口市保持适中的经济发展速度,对水资源及环境的需求和压力也适中,经济与水资源环境协调可持续地发展。

## 5 结论

随着城市化进程的加快和社会经济的快速发展,水资源的供需矛盾及由此造成的缺水危机将极大地影响甚至制约社会经济和资源环境的可持续发展。通过对龙口市水资源问题的系统动力学模拟及情景分析,可以看出:

(1)作为一种量化的研究方法,系统动力学方法在处理高度非线性、高阶次、多变量、多重反馈问题方面具有优势。将系统动力学方法运用于水资源问题研究,可为水资源科学决策提供可靠依据,有利于实现我国环境和经济的可持续发展。

(2)伴随着社会经济的发展,无论采取什么情景,要使得经济继续发展,龙口市的总需水量都会不断增加,情景0至情景4下龙口市2030年的总需水量分别为 $4.55 \times 10^8$ 、 $7.93 \times 10^8$ 、 $4.12 \times 10^8$ 和 $4.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。无论采取何种发展情景,龙口市在未来年份不能够彻底解决缺水的问题,但如果龙口市在社会经济的发展中选择情景3(可持续发展型情景),则可以缓解缺水的问题。因而龙口市在未来社会经济发展的过程中,应该采取情景3这样的发展情景,既追求社会经济的发展,亦强调水资源的保护,达到两者和谐、可持续地发展。

(3)为了使得龙口市社会经济、水资源和环境协调且可持续地发展,单独强调某一方面(情景0、情景1、情景2)是不可行的。过分强调经济的发展(情景1)、过分强调水资源保护的发展(情景2)或者保持目前的趋势(情景0),势必造成水资源和经济发展之间失衡,无法满足社会发展的需要和环境保护的要求。

(4)本文运用系统动力学方法构建的龙口市水资源系统动力学模型是有效的,本文所设计的情景3,即可持续型发展情景,可以极大地缓解龙口市缺水危机,提高水资源对社会经济生活的承载能力,且

表征水环境好坏的COD排放量控制在很低的范围内,可以保证水资源的质量满足社会发展的需要,是龙口市未来应该选择的发展情景。从龙口市的实际情况来看,决策者既不会采纳过分强调经济发展的情景,也不会采纳过分强调水资源保护的情景。只有保持经济发展与水资源保护的平衡,社会才能可持续地发展下去。

综上所述,为了达到社会经济发展、水资源利用和环境保护相协调发展的目的,本文建议龙口市应加强科技的发展和提高,综合考虑经济发展、水资源和环境保护,采取可持续的发展情景,这是提高龙口市水资源对社会经济承载能力、构建和谐社会、建设美好龙口的最佳决策方案。

## 参考文献:

- [1] 秦欢欢. 基于分布式水文模型和系统动力学方法的华北平原水资源可持续利用研究[D]. 北京:北京大学,2014.
- [2] 高亚,章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4): 103-109.
- [3] 张晓勇,黄卫,司蔚,等. 浅谈当前水资源的现状和问题及对策[J]. 山西化工,2007,27(5):68-70.
- [4] 童纪新,顾希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):122-125.
- [5] 徐征和. 龙口市农业水资源优化利用研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [6] 刘健勇,柳杨科,王希强,等. 龙口市水资源开发利用对策探讨[J]. 水资源保护,2004,20(1):66-68.
- [7] 张波,袁永根. 系统思考和系统动力学的理论与实践:科学决策的思想、方法和工具[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010.
- [8] Forrester J W, Jay W P. Industrial dynamics [M]. Cambridge, MA: MIT press, 1962.
- [9] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [10] 贾仁安,丁荣华. 系统动力学——反馈动态性复杂分析[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 蒯鹏,李巍,成钢,等. 系统动力学模型在城市发展规划环评中的应用——以山西省临汾市为例[J]. 中国环境科学,2014,34(5):1347-1354.
- [12] 汤洁,余孝云,林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型[J]. 生态学报,2005,25(5):1178-1183.
- [13] 滕宇思. 基于系统动力学的西安市土地综合承载力评价与预测研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.
- [14] 祝秀芝,李宪文,贾克敬,等. 上海市土地综合承载力的系统动力学研究[J]. 中国土地科学,2014,28(2):90-96.

78 - 84.

- [8] 广州海洋地质调查局. 华南西部滨海湿地地质调查与生态环境评价报告[R]. 广州海洋地质调查局, 广州, 2016 - 2017.
- [9] 广州海洋地质调查局. 南海北部湾全新世环境演变及人类影响研究成果报告[R]. 广州海洋地质调查局, 广州, 2013.
- [10] 黄向青, 林进清, 张顺枝, 等. 应用混合理论分析雷州半岛东岸海水入侵  $\text{Ca}^{2+}$  的迁移[J]. 勘查科学技术, 2015(1): 19 - 24.
- [11] 毕延凤, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸平原地下水化学特征研究[J]. 海洋通报, 2012, 31(3): 241 - 247.
- [12] 赵长荣, 杨吉龙, 肖国强, 等. 大连大魏家水源地海水入侵过程中水文地球化学作用分析及定量模拟[J]. 地质调查与研究, 2012, 35(2): 154 - 160.
- [13] 吴吉春, 薛禹群, 谢春红, 等. 海水入侵过程中水-岩间的阳离子交换[J]. 水文地质工程地质, 1996(3): 18 - 19.
- [14] 李亮, 邢怀学, 常晓军, 等. 福建长乐地区海水入侵(上溯)对水化学变化的影响[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 344 - 350.
- [15] 陈然, 郑西来. 大沽河地下咸淡水过渡带的水-岩作用模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(1): 95 - 101.
- [16] 雷鑫, 武雅洁, 冯峰. 海水入侵过程中阳离子交换的数值模拟[J]. 中国水运, 2016, 16(6): 107 - 108.
- [17] Han Dongmei, Post V E A, Song Xianfang. Groundwater salinization processes and reversibility of seawater intrusion in coastal carbonate aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 1067 - 1080.
- [18] Petelet - Giraud E, Négrel P, Aunay B, et al. Coastal groundwater salinization: Focus on the vertical variability in a multi-layered aquifer through a multi-isotope fingerprinting (Roussillon Basin, France) [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566 - 567: 398 - 415.

~~~~~

(上接第49页)

- [15] 刘婧尧, 胡雨村, 金相哲. 基于系统动力学的天津市水资源可持续利用[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2014, 48(1): 106 - 111.
- [16] Qin Huanhuan, Sun Amy Cha - Tien, Liu Jie, et al. System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain [J]. Water Policy, 2012, 14(2): 214 - 231.
- [17] Zarghami M, Akbariyeh S. System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran [J]. Resources Conservation and Recycling, 2012, 60(3), 99 - 106.
- [18] 秦剑. 水环境危机下北京市水资源供需平衡系统动力学仿真研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(3): 671 - 676.
- [19] 黄蕊, 刘俊民, 李麟楷. 基于系统动力学的咸阳市水资源承载力[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 57 - 63.
- [20] 张钧茹. 基于系统动力学的京津冀地区水资源承载力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [21] 张雄. 基于系统动力学的天津市水土资源可持续利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [22] 朱洁, 王烜, 李春晖, 等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 32 - 39.
- [23] 张波, 虞朝晖, 孙强, 等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(2): 1 - 4.