

北京市水资源供需二次平衡的系统动力学模拟与研究

秦欢欢

(东华理工大学 省部共建核资源与环境教育部重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对北京市水资源利用中存在的问题, 对该市 2012–2030 年的水资源供需进行了系统动力学模拟。结果表明: 北京市水资源供需矛盾突出, 2020 年和 2030 年分别缺水 10.95×10^8 和 8.44×10^8 m^3 , 缺水率 31.33% 和 20.75%; 二次供需平衡情景下该矛盾得到较大改善, 2020 年和 2030 年分别富余水 2.36×10^8 和 4.43×10^8 m^3 , 但这种富余是追求资源、环境保护而忽视经济发展而获得的, 对于北京市来说不太能接受; 为了维持经济、资源和环境的和谐发展, 北京市需要增强人们节约、保护水资源的意识, 才能保证水资源供需的长久平衡。

关键词: 水资源; 供需平衡; 系统动力学; 二次平衡分析; 北京市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0021-07

System dynamics simulation and study on the second time balance of water supply and demand in Beijing

QIN Huanhuan

(State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In view of the existing problems of water resources utilization in Beijing, this paper simulated the water supply and demand for this city from 2012 to 2030 by establishing a system dynamics model. The results showed: the water supply and demand contradiction in Beijing is very prominent, with the water shortages in 2020 and 2030 of 1.095 and 0.844 billion m^3 respectively and the corresponding water shortage rates of 31.33% and 20.75%. This contradiction has been greatly improved under the scenario of second time water supply and demand balance analysis, with water surplus in 2020 and 2030 of 0.236 and 0.443 billion m^3 respectively. It is unacceptable for Beijing, as this surplus of water was achieved by emphasizing the protection of resources and environment and ignoring the rapid economic development. In order to ensure the rapid development of social economy and maintain water supply and demand balance and sustainable development, Beijing also needs more efforts to enhance the people's awareness to protect water resources and save water. Only in this way can the long-term balance of water supply and demand be achieved in Beijing.

Key words: water resources; supply and demand balance; system dynamics; second time balance analysis; Beijing city

1 研究背景

作为水资源紧缺的特大型城市,北京市是全国严重缺水的 40 个城市之一,人均水资源占有量不足 $300 \text{ m}^3/\text{a}$,不到全国平均的 $1/8$ 和世界平均的 $1/30$,

远低于国际人均 $1\,000 \text{ m}^3/\text{a}$ 的缺水标准线^[1]。北京市多年(1999–2012)平均总水资源量为 $22.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年(1988–2012)平均总需水量为 $39.23 \times 10^8 \text{ m}^3$,长期处于水资源供需不平衡状态^[2]。水资源是社会经济发展的基础,水资源不足不仅会制约

收稿日期:2017-09-22; 修回日期:2017-11-30

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

作者简介:秦欢欢(1986-),男,江西南昌人,博士,讲师,研究方向:水文学与水资源。

城市发展,甚至还会对社会安稳产生影响^[3]。地下水是北京市主要的供水来源,开采量占总供水量的 70% 以上^[4-5],其超采导致了一系列生态环境问题,如地面沉降、土壤次生盐渍化等^[6]。随着人口的增长和经济的发展,北京市水资源供需矛盾将加剧并成为社会可持续发展的巨大障碍^[7]。因此,开展水资源供需平衡预测与分析,掌握其中的动态反馈关系,对北京市水资源可持续利用具有非常重要的现实意义^[8]。

水资源供需平衡分析是指针对一定研究区域内水资源的供需及余缺关系进行分析的过程^[9],达到揭示供需之间存在的矛盾、掌握开发利用的潜力与途径的目的,是水资源利用、保护与管理过程的理论指导和科学依据^[8-9],对于保障社会经济和自然环境的可持续发展具有非常重要的现实意义。目前,国内有许多学者针对不同区域进行了水资源供需平衡分析,如王雅竹等^[10]运用水资源供需平衡的基本理论,采用万元产值定额法,对不同时期新疆五家渠市水资源供需平衡进行预测和分析;秦剑^[11]利用系统动力学方法研究了水环境危机背景下北京市水资源的供需平衡问题。然而,传统方法不能系统刻画水资源供需之间复杂的反馈关系和动态的发展过程,也无法定量考虑影响需水量的诸多宏观经济、社会、技术和工程等因素之间相互影响、相互反馈的系统关系,无法捕获水资源供需的系统行为^[12-13],而系统动力学是解决这一问题的有效方法^[14-15]。

系统动力学(System Dynamics, SD)是一种比较成熟的方法,是美国麻省理工学院的福瑞斯特教授于 1958 年为分析生产管理以及库存管理等企业问题而提出的系统仿真方法^[16],在处理高度非线性、高阶次、多变量、多重反馈问题方面及水资源系统的动态变化和系统运行的因果机制分析中优势显著^[14],目前已广泛应用于工业、农业、生态、环境等领域^[1,5,12,17-18]。通过 SD 方法建立的模型可以反映研究区每一时刻的水资源系统状态,进而了解、掌握其供需之间的关系^[8],因此采用 SD 对多因素耦合的水资源复杂巨系统进行分析,可以保障经济、资源和环境三者的和谐发展,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^[14]。

本文通过建立北京市水资源 SD 模型,在模型校准的基础上模拟北京市 2012–2030 年的供水量和需水量,反映未来北京市水资源的供需能力及平衡关系。通过采用二次供需平衡分析方法,探讨北

京市水资源供需的现状和平衡缺口,为北京市水资源的合理配置和利用提供科学的依据,同时为北京市水资源短缺问题的解决提供有效的方案和建议。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域概况

北京市是我国的政治、经济和文化中心,位于华北平原北部,与河北、天津相接,地理位置为北纬 39.3°~41°、东经 115.75°~117.5°,总面积约 168 078 km²,包括平原区和山区两部分,其中后者约占总面积的 62%,平原区属山前冲洪积平原,一般海拔 10~50 m^[19]。北京市多年(1956–2003 年)平均降水量为 602.56 mm,但年际变化较大,年内分布也很不均匀,约 60%~80% 的降水集中在雨季(6–9 月),且有关研究结果显示北京年均降水量呈现随时间减少的趋势。

2.2 数据及来源

本文研究中所采用的数据及其来源主要有以下几类:(1)社会经济相关的数据,包括总人口及增长率、GDP 及增长率、大牲畜/猪/羊/家禽的数量、增长率及用水定额、各种农作物种植面积及增长率、来源于 1998–2005 年的《海河流域水资源公报》^[20]及 2000–2013 年的《北京市统计年鉴》^[21];(2)水资源相关的数据,包括地表水资源量、地下水资源量、南水北调水资源量、环境用水量、林渔业用水量等,来源于 2001–2012 年的《北京市水资源公报》^[2]及黄晶等(2009)^[22];(3)气象数据中,降水量数据来源于 2000–2013 年的《北京市统计年鉴》^[21]及 2001–2012 年的《北京市水资源公报》^[2],参考蒸散发数据来源于 Qin 等(2013)^[4];(4)农作物系数根据作物种类的生长周期的不同,参考周宪龙^[23]研究论文中的数据而确定;(5)与宏观经济及价格指数等相关的参数,如收入弹性指数、生活用水价格指数、生活水价、工业水价等,根据作者的研究经验和研究区的实际情况,同时参考 Cai 等(2002)^[24]和 Rosegrant 等(2002)^[25]而确定;(6)污水回用相关的指标数据,如污水产生率、处理率及回用率等,来源于 2001–2012 年的《北京市水资源公报》^[2]及 2000–2013 年的《北京市统计年鉴》^[21]。

3 北京市水资源供需模型

3.1 二次供需平衡分析

为了揭示水资源供需平衡态势及存在的问题,采用“二次供需平衡分析”法对北京市规划水平年

水资源供需平衡情势进行剖析^[26]。其中,一次平衡分析是在现状条件下,依据北京市当前的发展模式,对未来的水资源供需情景进行预测与分析,充分展示在没有采取任何措施情况下的水资源供需矛盾。二次供需平衡分析是在一次供需平衡分析的基础上,通过采取节水措施或挖掘现有水利工程设施的供水能力,并考虑规划建设的当地水源工程,再次进行的区域水资源供需平衡分析^[8,26]。

3.2 模型结构

根据北京市的社会经济实际情况,本文将北京市SD模型划分为人口、工业、农业及水资源等相互影响的4个子系统。水资源需求包括生活、工业、农业和环境4个方面,而水资源供给则包括地表水、地下水、污水回用及南水北调供水等4个方面,这两者一起对水资源的供需平衡关系产生影响(图1)。对于给定的水资源供给,用水需求则在北京市缺水问题上起着重要的决定作用。在概念模型的基础上,通过对模型变量之间因果关系的建立(图2),即可在 VENSIM Professional 软件中建立北京市水资源SD模型的系统流图,从而进行下一步的模型校准和预测。

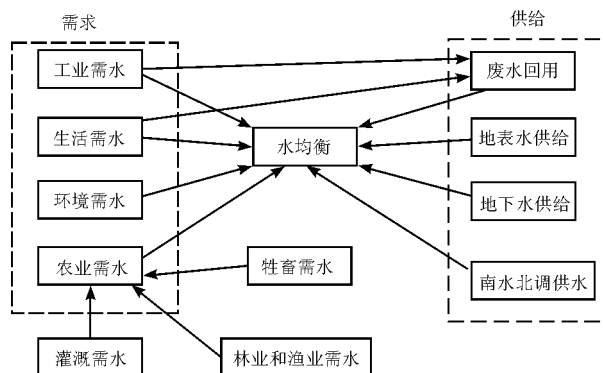


图1 北京市 SD 概念模型图

3.3 需水量计算

一般而言,总需水量(Total Water Demand, TWD)按用水部门可分为生活需水量(Domestic Water Demand, DWD)、工业需水量(Industrial Water Demand, IWD)、农业需水量(Agricultural Water Demand, AWD)和环境需水量(Environmental Water Demand, EWD)。AWD可分为灌溉需水量(Irrigation Water Demand, IrriWD)、牲畜需水量(Livestock Water Demand, LWD)和林渔业需水量(Forestry and Fishery Water Demand, FFWD)。FFWD和EWD是模型的输入变量,下面详细介绍其它需水量的计算方法。

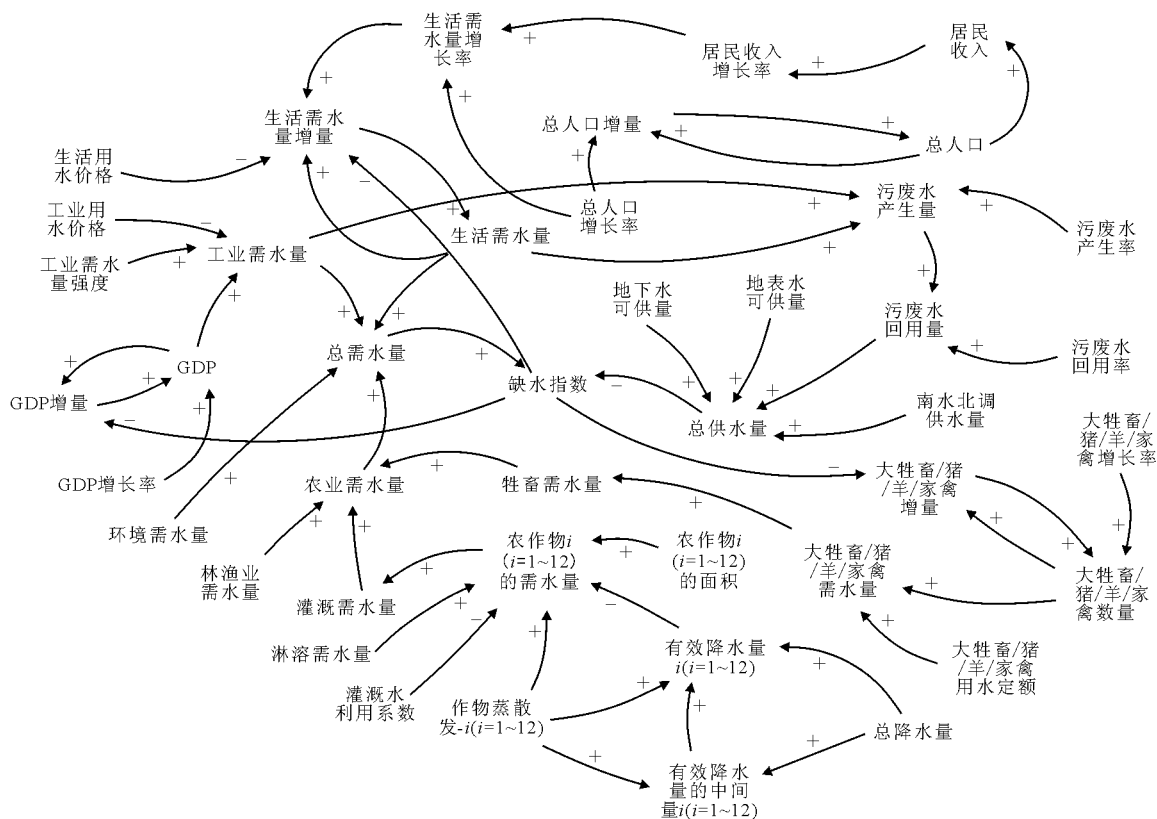


图2 北京市 SD 模型因果关系图

3.3.1 生活需水量 生活需水量的预测与人口及人均收入的增长有关,与 DWD 计算直接相关的是 DWD 的年增长率 ϕ_{DWD} 。决定 DWD 的因素包括总人口增长率 ϕ_{pop} ,人均收入增长率 ϕ_{gdp} , DWD 的收入弹性系数 η_{gdp} ,生活水价 P_{dw} ,生活水价弹性系数 η_p 和缺水指数 WDI 。 t 时刻的 DWD 可以计算为^[24-25]:

$$\begin{cases} DWD(t) = DWD(t - \Delta t) + \{ \phi_{DWD}(t) \cdot [P_{dw}(t)]^{\eta_p} \cdot f(WDI) \} \cdot dt \\ \phi_{DWD}(t) = \phi_{pop}(t) + \eta_{gdp}(t) \cdot \phi_{gdp}(t) \\ f(WDI) = \begin{cases} 1 & \text{if } WDI(t) \leq 0 \\ WDI(t)^{\eta_{WDI}} & \text{if } WDI(t) > 0; \end{cases} \\ WDI(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } WD(t) < 0 \\ \frac{WD(t)}{TWD(t)} = \frac{TWD(t) - TWS(t)}{TWD(t)} & \text{else} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δt 为时间步长; $f(WDI)$ 为 WDI 的函数; η_{WDI} 为 DWD 的缺水指数弹性系数; $WD(t)$ 、 $TWD(t)$ 和 $TWS(t)$ 分别为 t 时刻的缺水量、总需水量和总供水量。

3.3.2 工业需水量 工业需水量的计算取决于国内生产总值(GDP)、收入(人均 GDP,即 $GDPC$)、用水技术的进步及工业水价格 P_{IW} 。与计算 IWD 密切相关的是工业需水强度($IWDI$),它与 $GDPC$ 及时间变量 T 有线性的回归关系。 $IWDI$ 及 IWD 可以通过公式(2) 来进行计算^[24-25]:

$$\begin{cases} IWD(t) = GDP(t) \cdot IWDI(t) \cdot [P_{IW}(t)]^{\eta_{IWD}} \\ IWDI(t) = \alpha + \beta_{IWD}(t) \cdot GDPC(t) + \gamma(t) \cdot T(t) \\ T(t) = (t - 2000) + 100 \\ \alpha > 0, \frac{\partial IWDI}{\partial GDPC} = \beta_{IWD} < 0, \frac{\partial IWDI}{\partial T} = \gamma < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 是截距,模拟过程保持不变; $\beta_{IWD}(t)$ 时刻 t 的收入系数,反映了 $IWDI$ 随 $GDPC$ 的变化而变化的情况; $\gamma(t)$ 是时间系数,表示随科技的进步,用水技术发生的变化; η_{IWD} 是工业水价弹性系数。

3.3.3 灌溉需水量 $IrriWD$ 是依据农作物水文学及农学特征而进行计算得到的农作物需水量,灌溉需水量可由公式(3) 计算^[24-25]:

$$\begin{cases} IrriWD = \frac{NIrWD}{BE} \\ NIrWD = \sum_{cp} \{ A_{cp} \cdot [\sum_{st} (kc^{cp,st} \cdot ET_0^{st} - ER^{cp,st})] \} \cdot (1 + LR) \end{cases} \quad (3)$$

式中: cp 为农作物指数,表示农作物种类数; st 为农作物生长阶段指数,表示农作物生命周期内的生长

阶段情况; kc 为农作物系数; A 为农作物面积; ET_0 为参考蒸散发。

LR 为盐分浸出因素,由土壤及灌溉水的盐度来描述,通常为灌溉需水量的 10% ~ 15%; BE 为灌溉水利用系数; ER 为有效降水量; $NIrWD$ 作物净灌溉需水量。

3.3.4 牲畜需水量 牲畜需水量由数量与用水定额来计算,根据北京市的实际情况,本文考虑了 4 种牲畜:大牲畜(包括牛、马和其它大牲畜)、猪、羊和家禽。牲畜需水量可由公式(4) 计算:

$$LWD(t) = \sum_{i=1}^4 (Quota_i \cdot N_i(t)) \quad (4)$$

式中: $Quota_i$ 为第 i 种牲畜的用水定额; $N_i(t)$ 指 t 时刻牲畜 i 的数量; $i = 1, 2, 3, 4$ 分别代表大牲畜、猪、羊和家禽。

3.4 模型校准

北京市水资源 SD 模型的校准周期是 2001 - 2011 年,时间步长是 1 a,通过校准使得模拟结果与历史数据吻合,可用 4 个指标(通过公式(5) 来计算)来衡量:均方根误差(Root Mean Square Error, $RMSE$),平均误差(Mean Error, ME),平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE) 和相关系数(Coefficient of Correlation, R),其中 Sim_i 和 Obv_i 分别是第 i 年的模拟结果和历史数据, $\overline{Sim}$ 和 $\overline{Obv}$ 分别是模拟结果和历史数据的平均值, N 为年数。图 3 列出了 DWD 、 IWD 、 AWD 和 TWD 的模拟结果与历史数据的对比,表 1 列出了衡量拟合效果的指标值。

$$\begin{cases} RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Obv_i - Sim_i)^2} \\ ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Obv_i - Sim_i) \\ MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Obv_i - Sim_i| \\ R = \frac{\sum_{i=1}^N (Obv_i - \overline{Obv})(Sim_i - \overline{Sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Obv_i - \overline{Obv})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Sim_i - \overline{Sim})^2}} \end{cases} \quad (5)$$

总体来说,这 4 种需水量的模拟均反映了其动态变化的趋势。 DWD 呈增长趋势, IWD 和 AWD 则呈下降趋势, TWD 没有太大的变动。 DWD 和 IWD 的拟合结果很好, R 值在 0.93 以上(表 1); AWD 则次之, R 值为 0.83;而 TWD 则表现略差, R 值只有 0.41,主

要由 *AWD* 的计算所导致。*AWD* 的模拟结果比历史数据小,误差较大,原因在于过量灌溉在实际农业操作中很常见,从而造成实际灌溉量大于模拟灌溉量。这种行为无法在模型中得到精确的体现和衡量。表 1 中的值表明,*DWD* 和 *IWD* 的模拟结果很好,而 *AWD* 和 *TWD* 的则处于可接受水平。*DWD*、*IWD* 和 *AWD* 的 *R* 值均大于 0.82,这种高相关性表明模拟结果和历史数据拟合得很好,其他 3 个指标也都是适中的。表 1 和图 3 均表明了模型的可行性和适用性,可用于下

一步的预测及情景分析。

表 1 拟合结果衡量标准的计算值 10^8 m^3

指标	生活需量	工业需水量	农业需水量	总需水量
<i>RMSE</i>	0.6742	0.2584	3.0617	3.0786
<i>ME</i>	-0.4645	-0.1344	1.6334	1.0336
<i>MAE</i>	0.5282	0.2074	2.3698	2.3736
<i>R</i>	0.9366	0.9889	0.8255	0.4070

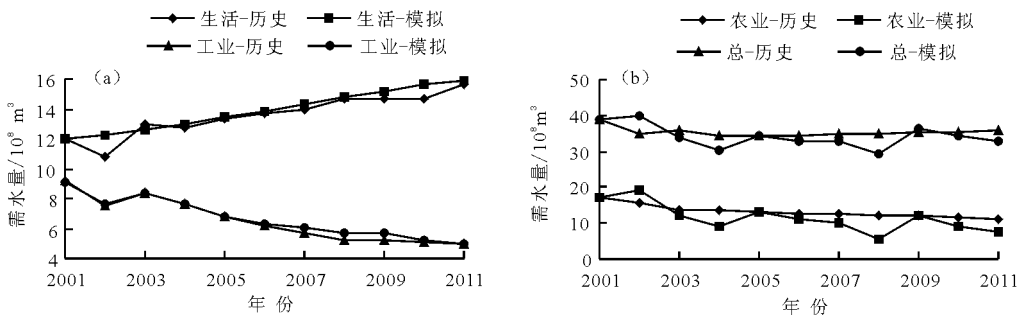


图 3 模型校准阶段模拟结果和历史数据的比较

3.5 情景设计

根据北京市社会发展的现状及“十三五”规划,本文采取了节水和增加供水相结合的方案来对北京市水资源供需进行二次平衡分析。根据 3.3 节中需水量的计算方法,生活和工业需水量的计算由于涉及到较多的社会经济因素,并不适合在情景设计中进行调整,同时考虑到农业用水是北京市的用水大户,故主要通过灌溉和牲畜需水这两部分采取节水措施来设计二次供需平衡分析的方案。一方面,分别减少 4 种牲畜用水定额 30%,同时将 12 种农作物的面积分别减少 10%,这样做既可以测试农业节水措施对水资源供需平衡的影响,亦不会对牲畜的饮水安全和北京市的粮食安全造成威胁甚至伤害。另一方面,在模型中考虑南水北调引水量,根据南水北调工程,2014 年 12 月 27 日中线工程开始给北京市供水,年供水量 $12 \times 10^8\text{ m}^3$ 。据此,模型中采用‘IF THEN ELSE’来处理,2015 年之后北京市增加供水 $12 \times 10^8\text{ m}^3$ 。二次供需平衡分析的方案见表 2。

4 模拟结果分析

在模型校准的基础上,根据设计的情景,对北京市 2012 – 2030 年水资源供需情况进行预测,进而进行一次及二次供需平衡分析,具体结果见表 3,图 4 是北京市 2012 – 2030 年总需水量和余缺水量的时

间序列图。

表 2 二次供需平衡分析方案设计

变量		当前模式	情景设计
每头牲畜用水定额/ $(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	大牲畜	14.60	10.22
	猪	14.60	10.22
	羊	2.920	2.044
	家禽	1.460	1.022
农作物面积/ hm^2	小麦	58100	52290
	玉米	140500	126450
	棉花	440	396
	大豆	5372	4835
	水稻	231	208
	薯类	2351	2116
	油料	4844	4360
	药材	2552	2297
	蔬菜	66800	60120
	瓜类及草莓	8204	7384
	饲料	4524	4072
	花卉	2960	2664
南水北调工程引水量/ 10^8 m^3		0	IF THEN ELSE (Time < 2015, 0, 12)

表 3 北京市水资源供需平衡分析结果

$10^8\text{ m}^3, \%$

供需 分析	预测 年份	总供 水量	需水量							余缺水量/ (需水量－供水量)	余缺水率 (余缺水量/供水量)
			农业			工业	生活	环境	小计		
			灌溉	牲畜	林渔						
一次平衡	2020	34.94	7.76	1.15	5.0	6.89	17.59	7.50	45.89	10.95	31.33
	2030	40.67	1.50	1.39	6.5	10.03	20.19	9.50	49.11	8.44	20.75
二次平衡	2020	46.75	6.99	0.80	5.0	6.59	17.51	7.50	44.39	－2.36	－5.05
	2030	52.29	1.35	0.96	6.5	9.52	20.03	9.50	47.86	－4.43	－8.47

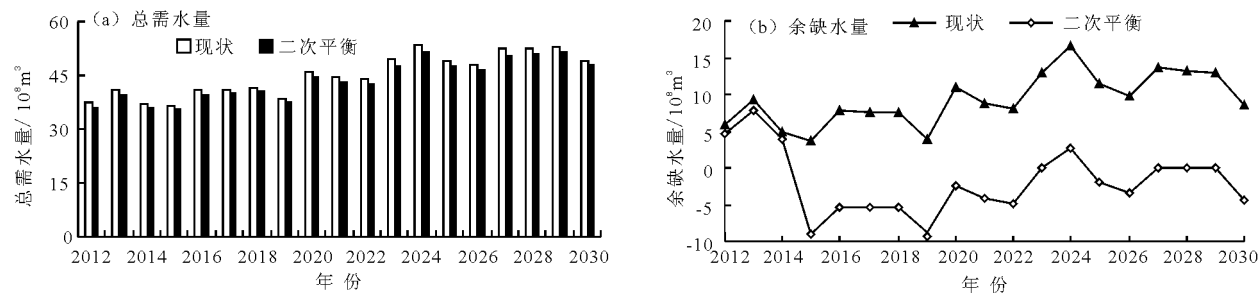


图 4 总需水量和余缺水量的预测结果

4.1 一次供需平衡分析

在现有供水工程条件和发展模式下,北京市水资源一次供需平衡分析的结果(表 3)显示,规划水平年 2020 年缺水 $10.95 \times 10^8\text{ m}^3$, 缺水率 31.33%; 2030 年缺水 $8.44 \times 10^8\text{ m}^3$, 缺水率 20.75%, 说明未来北京市的水资源不能满足社会经济用水要求, 缺水危机会伴随社会经济发展的全过程。从图 4 可以看出,在现有条件下,北京市未来将一直处于缺水的状态,水资源供需不平衡的矛盾始终存在,水资源将成为阻碍北京社会经济可持续发展的关键因素。

4.2 二次供需平衡分析

按照表 2 情景设计方案对北京市进行的二次供需平衡分析结果(表 3)显示,在规划水平年 2020 年、2030 年新增供水量分别为 11.81×10^8 和 $11.62 \times 10^8\text{ m}^3$;通过采取节水措施,2020 年、2030 年减少用水量分别为 1.5×10^8 和 $1.25 \times 10^8\text{ m}^3$;2020 年、2030 年分别有 2.36×10^8 和 $4.43 \times 10^8\text{ m}^3$ 的水富余。从图 4 中可以看出,北京市在预测期内有 5 年(2012 - 2014、2024、2027 年)还存在水资源供需不平衡的问题,但南水北调工程实施后(2015 年之后),通过该工程和节水措施的实施,北京市水资源供需矛盾得到根本的改善,水资源供需不平衡的问题基本能够得到解决。

二次供需平衡分析的结果说明,在保持目前发展趋势和模式的前提下,南水北调工程在解决北京

市水资源供需矛盾问题上能发挥巨大的作用,基本上可以解决北京市水资源供需不平衡的问题。然而,在我国社会经济高速发展的大环境下,北京市作为中国的政治、经济中心,要让其在未来完全为了资源、环境的保护而放弃经济的快速发展显得不太现实。正如表 3 和图 4 中所显示的,即便采用本文所设计的方案,经济保持目前的发展水平,同时增加供水及采取节水措施,北京市在 2020 年和 2030 年富余的水资源量也仅仅只有供水量的 5.05% 和 8.47%。如果北京市追求经济的高速发展,南水北调工程和节水措施的实施所带来的供需平衡将会被打破,北京市水资源的供需矛盾将重新出现。因此,北京市在未来所面临的水资源供需平衡形势非常严峻,为了既保证社会经济的高速发展,又维持水资源的供需平衡及可持续发展,北京市还需从“挖潜”和“节流”这两方面多下功夫,才能保证水资源供需的长久平衡,进而保障和促进经济的发展和社会的长治久安。

5 结 论

本文利用系统动力学模型,在模型中考虑了诸多影响需水量的因素,对北京市的水资源进行了一次和二次供需平衡分析,结果表明:

(1)水资源一次供需平衡分析时,北京市水资源供需矛盾突出,2020 和 2030 年缺水量分别为

10.95×10^8 和 $8.44 \times 10^8 \text{ m}^3$, 缺水率达 31.33% 和 20.75%; 通过水资源二次供需平衡分析, 北京市水资源供需矛盾得到了较大改善, 2020 和 2030 年富余水量分别为 2.36×10^8 和 $4.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占供水量的 5.05% 和 8.47%。

(2) 水资源二次供需平衡分析表明, 在保持目前的发展趋势和模式的前提下, 南水北调工程在解决北京市水资源供需矛盾问题上能发挥巨大的作用, 基本可以解决水资源供需不平衡问题。

(3) 为了既保证社会经济的高速发展, 又维持水资源的供需平衡及可持续发展, 北京市还需从“挖潜”和“节流”这两方面多下功夫, 增强人们保护水资源和节约用水的意识, 才能保证水资源供需的长久平衡, 进而保障和促进经济的发展和社会的长治久安。

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] 北京市水务局. 北京市水资源公报 [Z]. 2001–2012.
- [3] 魏保义, 王 军. 北京市水资源供需分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(2): 40–41+54.
- [4] QIN Huanhuan, CAO Guoliang, KRISTENSEN M, et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management [J]. Hydrology Earth System Sciences, 2013, 17(10): 3759–3778.
- [5] QIN Huanhuan, SUN A, 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.
- [6] 石建省, 李国敏, 梁 杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控 [J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527–534.
- [7] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15–19.
- [8] 王伟荣, 张玲玲, 王宗志. 基于系统动力学的区域水资源二次供需平衡分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 47–49+81.
- [9] 周 益, 李援农. 石羊河流域水资源供需平衡分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 86–89.
- [10] 王雅竹, 石 炼. 五家渠市水资源供需平衡及水资源承载力分析 [J]. 中国农村水利水电, 2013(6): 16–20.
- [11] 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.
- [12] SUN Yuhuan, LIU Ningning, SHANG Jixia, et al. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 613–625.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王振江. 系统动力学引论 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988.
- [17] KAABI B, AHMED S B. Assessing the effect of zoono-phylaxis on zoonotic cutaneous leishmaniasis transmission: a system dynamics approach [J]. Biosystems, 2013, 114(3): 253–260.
- [18] RAMLI N N, SHAMSUDIN M N, MIHAMED Z, et al. The impact of fertilizer subsidy on Malaysia paddy/rice industry using a system dynamics approach [J]. International Journal of Social Science and Humanity, 2012, 2(3): 213–219.
- [19] 余 成. 基于水流过程及地下水年龄模拟的地下水脆弱性评价方法 [D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [20] 海河流域水资源保护局. 海河流域水资源公报 [Z]. 1998–2005.
- [21] 北京市统计局. 北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000–2013.
- [22] 黄 晶, 宋振伟, 陈 阜, 等. 北京市近 20 年农业用水变化趋势及其影响因素 [J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 103–108.
- [23] 周宪龙. 北京地区种植业水资源优化利用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [24] CAI Ximing, ROSEGRANT M W. Global water demand and supply projections: Part 1. A modeling approach [J]. Water International, 2002, 27(2): 159–169.
- [25] ROSEGRANT M W, CAI Ximing. Global water demand and supply projections: Part 2. Results and prospects to 2025 [J]. Water International, 2002, 27(2): 170–182.
- [26] 张黎渊. 基于三次平衡原理的水资源供需平衡分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2008(1): 19–20+24.