

基于水资源综合模拟与调配一体化模型的北京市水资源模拟分析

曹永强, 李玲慧

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:在探讨2007—2018年北京市水资源供需平衡情况的基础上,利用WAS模型对1980—2018年北京市水资源进行动态模拟研究,分析区域自然-社会水循环转化模式,探讨社会水循环与自然水循环的转化机理。结果表明:2007—2018年北京市年均需水量(实部、虚部)呈上升趋势,年均蓝色供水36.85亿m³,绿色供水16.90亿m³;需水缺口呈显著增大趋势,年均水资源缺口为165.20亿m³;1982—2010年北京市多年平均及25%、50%和75%径流总量特征频率年模拟与实测误差率分别为7.0%、4.8%、1.2%和0,模型精度较高;各计算单元自然水循环下出流量由东北部向西南部递增,自然-社会水循环下实际出流量有所下降。

关键词:水资源配置;WAS模型;自然-社会二元水循环;北京市

中图分类号:TV212.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)06-0025-07

Simulation analysis of water resources in Beijing based on integrated comprehensive water simulation and allocation model//CAO Yongqiang, LI Linghui (*School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Da Lian 116029, China*)

Abstract: Based on the discussion of the balance between supply and demand of water resources in Beijing in recent 12 years, water allocation and simulation (WAS) model was used to conduct a dynamic simulation study of water resources in Beijing from 1980 to 2018. The transformation model of regional natural-social water cycle was analyzed, and the transformation mechanism of social water cycle and natural water cycle was discussed. The results show that from 2007 to 2018, the average annual water demand of both real and imaginary parts of Beijing rises. The average of annual blue water supply is 3.685 billion m³ and green water supply is 1.69 billion m³. The water demand gap shows a significant increase trend with a perennial average of 16.52 billion m³. The verification results of the established WAS model show that the simulated and measured error rates of the annual average and characteristic frequencies of 25%, 50% and 75% runoff volume in Beijing from 1982 to 2010 are 7.0%, 4.8%, 1.2% and 0, indicating a high model accuracy. The flow rate of each calculation unit under the natural water cycle increases from northeast to southwest, while the actual flow rate decreases under the natural and social water cycle.

Key words: water resources allocation; WAS model; nature-society dual water cycle; Beijing

水资源是人类生存和经济社会发展的物质基础,是不可替代的重要自然资源^[1]。中国是世界上严重缺水的国家之一,缺水状况十分严重^[2]。北京市是典型的资源型缺水城市,一直以来存在着水资源供不应求、对外来水源依赖性大等问题,这样的局面对于城市建设及经济发展有着很大制约^[3]。在多次临时性调水工程的缓解下,近年来,北京市在城市供水的水源结构、供水系统网络、需水格局等方面都发生了显著变化^[4-5]。为充分利用现有水资源,建

立适应复杂水环境的区域水资源配置体系,保障北京市社会经济的发展,亟须对新形势下北京市城市水源的配置进行研究。

水资源优化配置一直以来是国内外的研究热点,关于水资源优化配置模型的开发和应用成果十分丰硕。Willis等^[6]构建了地表水-地下水沟壑规划模型。Andrew等^[7]为适应规划周期内的不确定性,采用随机非线性规划方法构建了多目标多周期水资源配置模型,并将该模型应用于澳大利亚昆士兰州

东南部。林春坤^[8]在生态需水量的基础上,初步开发了用于永定河的多水源配置综合调控模型。邵玲玲等^[9]基于分散优化方法建立了流域水资源配置模型,并将配置结果与集中优化配置结果进行对比,发现分散优化配置模式更加符合漳河流域的管理目标。以上这些模型大多仅从自然水循环或社会水循环单方面进行水资源配置模拟,对于自然-社会二元水循环模式及其间的互馈机理的相关探讨还有待深入。

许多学者针对北京市进行了水资源配置研究。例如,杨勇等^[10]对北京市门头沟区 2020 年及 2035 年供需水量进行预测,并利用二次平衡法进行水资源配置,结果表明 2020 年和 2035 年门头沟区可供水量均能满足需水要求。宋万祯等^[11]通过对 2035 年情景下北京市需水和可供水量的结构化分析,发现偏枯年份下北京将面临 9.7 亿 m³ 的用水缺口。以往的研究为北京市水资源供需平衡及未来情景模拟方面提供了丰硕的成果,但同时结合区域水资源供需平衡及自然-社会二元水循环理论进行北京市水资源配置的相关研究较少,而水资源综合模拟与调配一体化模型(water allocation and simulation model, WASS 模型)恰好能弥补这一不足。该模型是由桑学锋等^[12]研发出的一种基于二元水循环理论和水资源配置理论的水资源动态模拟与配置模型。该模型将自然水循环与社会水循环过程有机结合,实现了水资源系统的动态反馈,有效弥补了以往模型的弊端^[13],适用于区域水资源的数量计算和组成分析,进而实现水资源均衡开发利用。此外,虽然 WAS 模型适用范围较广,但现阶段国内的应用较少,尤其是针对北京市的研究比较稀缺。因此,本文在充分探讨北京市水资源供需平衡情况的基础上,选用 WAS 模型对北京市水资源进行动态模拟,深入分析区域自然-社会二元水循环模式及其互馈机理。研究成果不仅为模型的应用及北京市水资源优化配置研究提供新的参考,也为区域经济社会可持续发展和水联网发展提供科学依据。

1 研究区概况

北京市位于华北平原的西北部,处于东经 115°20′~117°30′,北纬 39°28′~41°05′之间,属温带大陆性季风气候^[14]。1980—2018 年多年平均降水量 538.1 mm,潜在蒸散发量 792.7 mm。北京市供水水源包括地表水、地下水、再生水、南水北调和应急水源等^[15]。多年平均地表水资源量 11.6 亿 m³,地下水资源量 19.1 亿 m³,外调水资源量 12.6 亿 m³。用水量主要包括生活用水、工业用水、农业用水及生态用水^[16]。多年平均生活用水量 9.2 亿 m³,工业用水

量 7.2 亿 m³,农业用水量 12.3 亿 m³,生态用水量 2.4 亿 m³。北京市土地利用类型主要以林地为主,占研究区总面积的 46% 以上;其次为居工地,占比约 16%;旱地、小麦玉米、草地、蔬菜占比依次靠后;最少是园地和水域。最后两种土地利用类型未超过总面积的 5%。

2 材料与方法

2.1 水资源供需量计算

a. 需水量计算。本文按照以往研究成果,将水资源需求量分为实部与虚部,实部代表本区域的生活和生态用水,虚部为支撑生活生态的生产及服务用水,包括衣食住行各方面,具体计算方法参考文献[17-18]。所需计算数据取自《北京市水资源公报》及《北京统计年鉴》,时间尺度为 2007—2018 年。其中,食品虚拟水中涉及的农产品相关虚拟水计算,采用 Penman-Monteith 公式计算^[19];动物产品相关的虚拟水计算以统一值为准^[20](表 1)。

表 1 单位农产品和动物产品虚拟水					
单位:m ³ /kg					
粮食	油	蔬菜	猪肉	牛肉	羊肉
1.33	3.10	0.32	2.21	12.56	5.20
禽类	水产品	蛋类	奶类	瓜果	糖
3.65	5.00	3.55	1.00	0.80	0.93

b. 供水量计算。本文将供水量按照蓝水和绿水的定义进行分类研究。其中,蓝水为降水过程中形成的地表水和地下水,绿水为降水过程中渗透到非饱和土壤层中作用于植物生长的水^[21-23]。蓝水供水量计算所需数据主要来源于 2007—2018 年《北京市水资源公报》,绿水供水量的计算参考文献[24]中北京市直接降水利用量。

2.2 WAS 模型所需数据及计算

a. 气象数据。降水及蒸发等相关气象资料采用北京市内及邻近的 20 个气象站逐日气象数据,时间尺度为 1980—2018 年,采用泰森多边形法^[25-26]得到 16 个计算单元面降水量及面蒸发量数据。其中,日降水而无产流的情况参照文献[10-11],结合北京实际情况进行日有效降水分析处理:

$$P_{dy} = P_{d0} \alpha_{df} \quad (1)$$

式中: P_{dy} 为日有效降水量; P_{d0} 为日实际降水量; α_{df} 为不同日降水强度产水修正系数。根据区域降水资料和水文断面流量对比分析,发现日降水 10 mm 以下基本不产流,降水与产流表现为指数关系,拟合公式为

$$\alpha_{df} = \begin{cases} 0 & P_{d0} < 10 \\ 0.42 \ln P_{d0} - 0.87 & 10 \leq P_{d0} \leq 80 \\ 1 & P_{d0} > 80 \end{cases} \quad (2)$$

b. 经济社会数据。经济社会用水资料取自海河水利网 (<http://www.hwcc.gov.cn>) 及《北京市水资源公报》《海河流域水资源公报》等资料,时间尺度为 1980—2018 年。

3 结果与分析

3.1 北京市水资源供需平衡分析

3.1.1 北京市需水量变化趋势

以 2007—2018 年北京市水资源供需结构为基础,对其水资源供需关系进行核算,分析其进口与出口虚拟水的情况,各行业需水情况如表 2 所示。总体来看,2007—2018 年北京市需水量实部整体呈逐年递增趋势,速率为 1.330 亿 m³/a,年均需水量实部为 23.38 亿 m³/a。具体来看,2007—2018 年北京市衣着、食品、居住、交通虚拟水含量均呈逐年递增的态势,年均值依次为 5.99 亿 m³、84.39 亿 m³、29.62 亿 m³、43.57 亿 m³。近年来,不断提速的城市化使城市人口数量显著增加,加之科技和社会的不断进步,居民在衣食住行各类的消费结构逐渐由单一化趋向多样化,使得城市各类虚拟水增长速度及水量均有所增加。

表 2 2007—2018 年北京市需水情况 单位:亿 m³

年份	需水实部	需水虚部			
		衣	食	住	行
2007	17.12	3.07	62.41	10.90	20.40
2008	18.53	3.40	64.69	12.65	21.33
2009	18.91	4.09	72.41	14.45	27.12
2010	19.27	5.03	75.22	16.82	35.50
2011	20.82	5.64	80.90	20.06	37.53
2012	21.71	6.71	79.80	22.51	41.36
2013	22.20	7.33	90.94	26.62	45.81
2014	24.24	6.40	86.12	29.47	50.11
2015	27.90	7.10	103.7	45.65	56.45
2016	28.92	7.12	94.69	49.42	59.17
2017	29.67	7.83	96.23	52.21	62.28
2018	31.28	8.25	105.64	54.66	65.78

3.1.2 北京市供水量变化趋势

2007—2018 年北京市蓝水供水量年际变化如图 1 所示,可见其以 0.466 亿 m³/a 的速率显著增长,年均蓝水供水量为 36.85 亿 m³。目前,北京市水资源总量持续减少,水资源供需矛盾愈发剧烈,水资源承载能力有所降低。随着人口增长和经济规模的扩大,生活用水量持续增长,我国开始实施南水北调工程,此后蓝水供水量逐步增加,有效缓解了水资源短缺问题。2007—2018 年北京市年均绿水供水量为 15.90 亿 m³。近年来,北京市降水量远少于当地水资源量,表明该地区对外水依赖性较强,其经济发展还有赖于附近地区的供水。

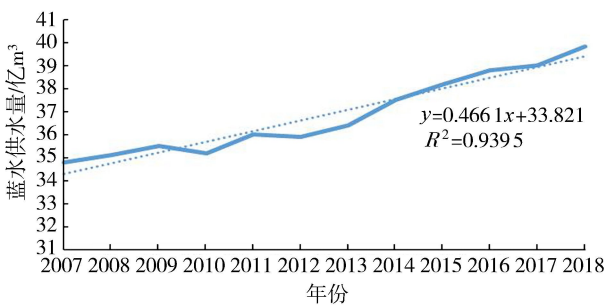


图 1 北京市蓝水供水量

3.1.3 北京市需水缺口变化趋势

2007—2018 年北京市水资源需求缺口变化情况如图 2 所示,图中需水缺口为负值表明实际供给小于需求,说明维持本地生存发展需要外地虚拟水的输入。2007—2018 年北京市需水缺口以 18.394 亿 m³/a 的速率显著增大,年均水资源缺口为 165.20 亿 m³。结合上文对供需水量的分析可知,尽管 2007—2018 年北京市供水量呈上升趋势,但其增长速率远小于需水量,这也反映出水资源开发管理模式一直以来无法满足城市化建设和经济的发展。加之一开始其供水量就少于需水量,导致需水缺口越来越大,北京市水资源出现供不应求的严峻局面,对外地来水具有很大依赖性,需识别北京市强人类活动区水循环演变规律特征,优化区域水资源配置模式。

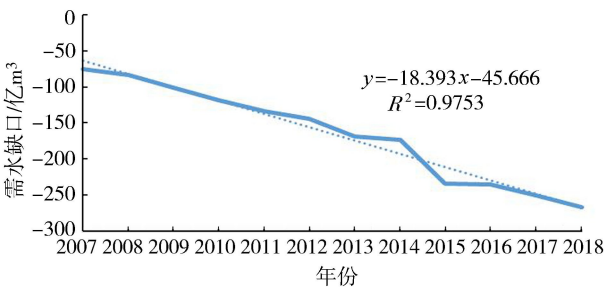


图 2 北京市水资源需求缺口

3.2 WAS 模型构建与模拟验证

3.2.1 模型构建

a. 模型计算单元划分。针对北京市河网水系、水利工程特点和区域单元行业用水等实际情况,基于 WAS 模型的原理与方法,构建北京市 WAS 模型,模型单元采用行政分区嵌套水资源三级区进行剖分,划分出 16 个基本单元;同时选取北京市 18 座大中型水库参与模型构建,水库及计算单元空间分布如图 3 所示;在计算单元基础上叠加土壤类型、土地利用类型后,最终划分出 157 个水文计算单元(表 3)。

b. 模型参数调整。模型模拟期为 1980—2010 年,其中 1980—1981 年为模型预热期,1982—1995 年为模型参数率定期,1996—2010 年为模型验证期。考虑北京市水资源循环变化和社会历史取用水实际情况,在水资源配置部分采用规则的配置方法,



图3 北京市水库分布及 WAS 模型计算单元划分

表3 北京市水库分布及 WAS 模型计算单元划分

计算单元序号	计算单元名称
C020100110116	怀柔区北三河山区
C020100110228	密云区北三河山区
C020300110229	延庆区永定河册田水库至三家店区间
C020100110117	平谷区北三河山区
C020100110114	昌平区北三河山区
C020400110113	顺义区北四河下游平原
C020400110100	北京市市辖区北四河下游平原
C020300110109	门头沟区永定河册田水库至三家店区间
C020400110112	通州区北四河下游平原
C030100110111	房山区大清河山区
C020400110115	大兴区北四河下游平原
C020100110229	延庆区北三河山区
C020400110117	平谷区北四河下游平原
C020400110114	昌平区北四河下游平原
C020100110113	顺义区北三河山区
C030200110111	房山区大清河淀西平原

以水源供水分配比例系数为主进行调配水量,模型调参的具体步骤为:①假定整个研究区水文参数的初始值,模型调参和验证期水资源配置部分采用规则配置方法;②通过断面流量过程、断面特征频率径流总量、区域配置供用水总量等指标校验方法,对率定期(1982—1995 年)参数进行水文参数调参;③基于率定期调参结果,将参数带入验证期(1996—2010 年),并采用上述计算方法检验模型模拟效果,如果效果不理想,重复步骤②;④开展模型模拟与实测数据的对比和误差分析,检验模拟效果。当率定期与验证期模拟效果均满足要求时,结束模型调参。通过以上调参方法对模型关键参数进行率定与验证,得到模型关键参数阈值结果如表 4 所示。

3.2.2 模拟结果验证

a. 自然水循环模拟验证。自然水循环校验包括断面流量过程、断面特征频率径流总量,具体计算及验证方法参考文献[12-13]。密云水库为北京市最大的水库,其控制面积较大,基本可以反映北京市径流情况,因此选择密云水库所在位置作为模型校

表 4 模型关键参数阈值

类别	参数	初始值	最终值	含义
蒸散发	K_f	45	50 ~ 150	地表截流蒸发调蓄能力
	K_{el}	1	1.12 ~ 1.76	单元土壤蒸发调节系数
	K_{ek}	0.05	0.08	浅层水蒸发调节系数
地表径流	F_s	90	88 ~ 267	土壤最大下渗能力
	U_s	0.5	0.44	土壤饱和含水度
壤中流	α_{ss}	0.4	0.22	土壤壤中流的出流系数
	α_{sx}	0.4	0.3 ~ 0.5	土壤对浅层地下水的补给系数
	α_{sk}	0.0005	0.00041 ~ 0.00066	浅层地下径流系数
地下径流	α_{xm}	0.0001	0	深层地下径流系数
	β	0.0001	0	浅层补给深层水系数
	μ_k	0.03	0.02 ~ 0.04	浅层水给水度
	μ_m	0.01	0.01 ~ 0.02	深层水给水度
供用水	S_{hp}	0 ~ 1	0 ~ 1	水源行业分水比
	H_{qz}	1 : 1 : 1 : 1	0.8 : 1 : 1 : 1	行业权重系数比 (生活 : 工业 : 农业 : 生态)
	E_{dl}	0.3	0.42	生活蒸发系数
耗水	E_{indu}	0.5	0.5 ~ 0.78	工业蒸发系数
	E_{rewq}	1	1	污水收集系数
排水	E_{rewd}	1	0.6 ~ 0.85	污水处理系数

验断面(图 3)。经过模型参数迭代调整,模型模拟与实测过程比对见图 4,调参率定期和验证期的性能指标见表 5。采用相关系数 R^2 、Nash 效率系数作为 WAS 模型河道断面流量效果的性能指标,通常情况下, R^2 在 0.8 ~ 1.0 之间表现为极强相关;Nash 系数在 0 ~ 1 之间变化,其值越大表示拟合效果得越好^[11]。由表 5 可知模型精度较高。

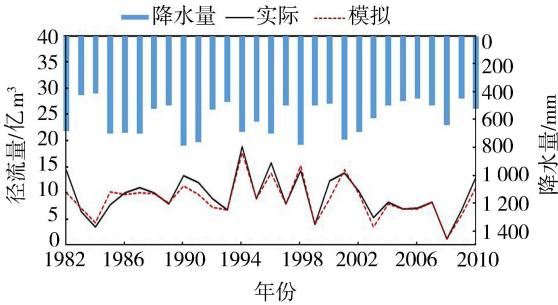


图 4 密云水库模拟径流与实测径流对比

表 5 模型断面流量率定验证结果

模型期	R^2	Nash 系数
率定期(1982—1995 年)	0.82	0.68
验证期(1996—2010 年)	0.86	0.59

以北京市密云水库地表水资源量作为断面径流总量进行验证,对 1982—2010 年多年平均和 25%、50%、75% 典型频率年下的地表水资源量与模型模拟的地表水资源量计算相对误差率,模拟效果如表 6 所示。其中多年平均误差为 7.0%;25%、50% 和 75% 频率年误差率分别为 4.8%、1.2% 和 0,模型模拟误差总体来说较低,具有可信度。综合断面流量过程模拟结果,模型模拟结果精度较高,可以满足

足水资源评价要求,进行下一步调参。

表 6 断面径流模拟结果及误差率

水文年	实测地表 水资源量/亿 m ³	模拟地表 水资源量/亿 m ³	误差率/%
多年平均	15.80	16.90	7.0
25% 频率年	18.70	19.60	4.8
50% 频率年	17.20	17.40	1.2
75% 频率年	8.70	8.70	0

b. 社会水循环模拟验证。基于上述水文模型参数率定结果,以 2018 年北京市各区需水量为基础,进行现状年水资源配置与调配模型参数模拟验证。从区域供水结果(图 5)来看,2018 年实际供水量 39.3 亿 m³,模拟供水总量 38.7 亿 m³,全市水资源配置总量误差为 1.4%。从各区供水总量来看,误差最大为大兴区 8.4%,误差最小的是密云区 0.1%;除顺义区、门头沟区及大兴区外,其余区模拟误差率均低于 5%。从各水源供水总量模拟对比结果(图 6(a))来看,再生水和地表水供水误差相对较大,分别为 5.4% 和 5.0%,外调水和地下水误差均小于 5.0%,其中外调水模拟效果最好,误差率

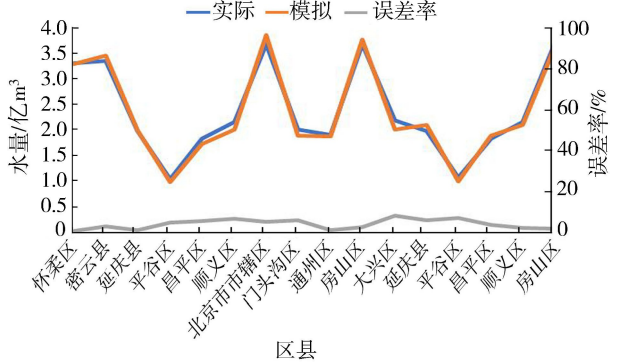


图 5 北京市各区供水总量模拟对比

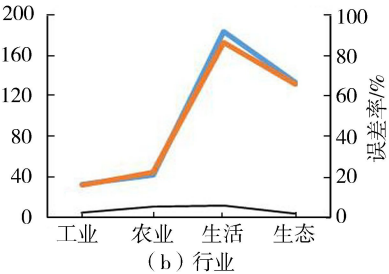
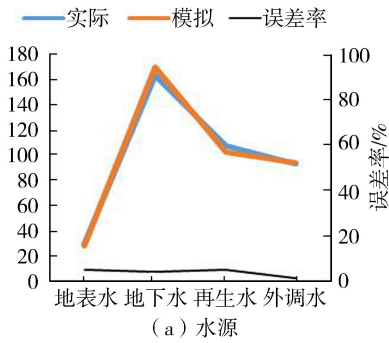
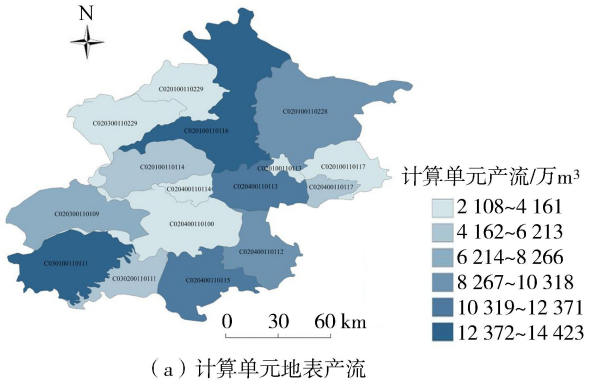


图 6 北京市分水源、行业供水模拟对比

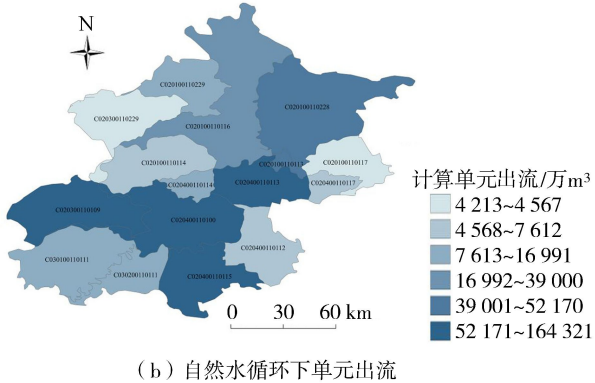
1.6%。从各行业供水(图 6(b))来看,生活、工业、农业等行业的配置结果与现状各行业供水基本一致,平均误差在 4% 以内;将各区、各水源、各行业的模拟配置水量结果和实际水量数据进行相关性分析,其相关系数均达到 0.99,表明建立的模型较好,可以满足水资源管理要求。

3.3 北京市自然-社会水循环转化分析

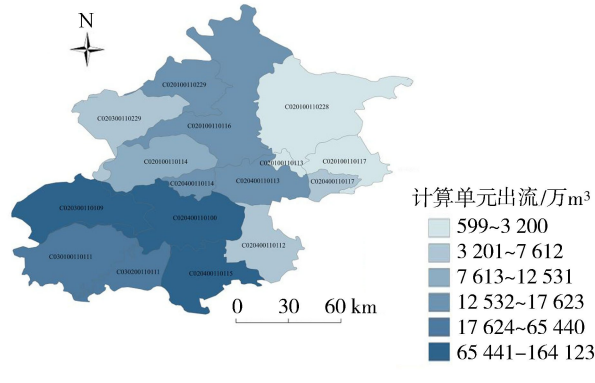
为进一步厘清社会水循环与自然水循环的转化机理,在此基础上作出北京市不同水循环下各计算单元产流分布(图 7)。分析可知,北京市地表水空间分布差异较大,整体上中部地区较低,东部地区高于西部地区。基于上下游汇流关系,可以得到在自然水循环下各计算单元出流量,可知北京市计算单元出流量在空间分布上相对均衡,且由于提水引水工程的实施使得出流量由东北部向西南部递增。



(a) 计算单元地表产流



(b) 自然水循环下单元出流



(c) 自然-社会水循环下单元出流

图 7 北京市不同水循环下计算单元产流

通过 WAS 模型模拟得到自然-社会水循环下北京市计算单元出流量分布情况如图 7(c) 所示,对比图 7(b)可以看出,自然-社会水循环下计算单元实际出流量大多出现了不同程度的下降。结合图 7 及北京市自然水循环与自然-社会水循环具体水量(表 7)分析可知,在考虑自然-社会水循环后,由于河北省内部社会取水排水,以及水库的调蓄作用,导致北京入境水量相比仅考虑自然水循环条件下减少了 25.5%,同时由于北京自身存在跨流域调水、社会取水排水及水库调蓄,在本地产流基本不变的情况下,北京市出境水量减少了 15.4%,其中社会排水占总出境水量的 32.3%。这主要是社会取水过程消耗了单元内部大量水,从而导致实际出流量降低,上游单元向下游单元的汇流量也有所减少。但在部分大中型水库向多个单元供水的调节功能下,相应单元地表水出流量也有所均衡。

通过分析研究结果发现,在供水水源结构复杂、供水用户多、供水网络环路复杂的环境下,北京市水资源目前存在供需不平衡、需水缺口大、地表水分布不均、外调水依赖性大等问题,水资源配置方案有待优化^[27]。根据城市未来水资源供需规划要求,结合复杂供水网络布局、外调水规划,未来北京市应进一步推进节水与非常规水利用,充分利用地下水库,加大应急水源,增强供水系统弹性,并根据新的城市布局完善管网系统,优化供水系统调度。此外,北京市供水形势严峻,需水缺口较大,相关部门要提前制定好各种来水水平下的供水保障方案,构建多途径供水保障体系,保障北京市供水安全。

表 7 自然水循环与自然-社会水循环水量对比 单位:亿 m³

水量	入境	出境	外调水	地表产流	取水	排水
自然水循环	24.7	37.6		13.1		
自然-社会水循环	18.4	31.8	12.1	13.5	41.8	10.3

4 结 论

a. 从水资源供需平衡方面来看,2007—2018 年北京市需水量整体呈逐年递增趋势,年均需水量实部为 23.38 亿 m³,衣食住行年均虚拟水含量依次为 5.99 亿 m³、84.39 亿 m³、29.62 亿 m³和 43.57 亿 m³;蓝水供水量为 36.85 亿 m³,绿水供水量为 16.9 亿 m³;需水缺口显著增大,多年平均值为 165.20 亿 m³。

b. 从 WAS 模型的构建与校验来看,1982—2010 多年平均及 25%、50% 和 75% 径流总量特征频率年模拟与实测误差率分别为 7.0%、4.8%、1.2% 和 0;2018 年全市水资源配置总量误差为 1.4%;各区、各水源、各行业的模拟配置水量结果和实际水量数据相关系数均达 0.99 以上,模拟结果精

度较高。
c. 北京市地表产流空间分布差异较大,整体上中部地区较低,东部地区高于西部地区;自然水循环下出流量相对均衡,由东北部向西南部递增;自然-社会水循环下实际出流量出现不同程度的下降。社会用水使入境水量减少了 25.5%,出境水量减少了 15.4%。

参考文献:

[1] 贾学秀,严岩,朱春雁,等. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. 自然资源学报,2016,31(10):1784-1791. (JIA Xuexiu,YAN Yan,ZHU Chunyan,et al. A review of regional water resource stress analysis and evaluation methods[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(10):1784-1791. (in Chinese))

[2] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (HUANG Zhihong,DONG Zengchuan,ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))

[3] 刘寒青,赵勇,李海红,等. 基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(1):34-41. (LIU Hanqing,ZHAO Yong,LI Haihong,et al. Optimal allocation of water resources in Beijing based on interval two-stage stochastic planning [J]. South-to-north Water Diversion and Water Resources Science and Technology, 2020, 18 (1): 34-41. (in Chinese))

[4] 周斌,桑学锋,秦天玲,等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):6-10. (ZHOU Bin,SANG Xuefeng,QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(3):6-10. (in Chinese))

[5] 马东春,唐摇影,于宗绪. 北京市再生水利用发展对策研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2020,50(5):779-786. (MA Dongchun,TANG Shengying,YU Zongxu. Research on development countermeasures of reclaimed water utilization in Beijing [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2020,50(5):779-786. (in Chinese))

[6] WILLIS R, FINNEY B A, ZHANG D. Water resources management in north China plain[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1989,115(5):598-615.

[7] ANDREW H, AINSLEY A, STEFAN H. A stochastic non-linear programming model for a multi-period water resource allocation with multiple objectives [J]. Water Resources Management,2008,22(10):1445-1460.

[8] 林春坤. 永定河流域水资源优化配置研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.

[9] 邵玲玲,牛文娟,唐凡. 基于分散优化方法的漳河流域水资源配置[J]. 资源科学,2014,36(10):2029-2037.

- (SHAO Lingling, NIU Wenjuan, TANG Fan. Decentralized optimization method for water resource allocation in the Zhang River Basin[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2029-2037. (in Chinese))
- [10] 杨勇, 李元春. 北京市门头沟区水资源配置研究[C]//北京市水科学技术研究院. 北京水问题研究与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 7-9.
- [11] 宋万祯, 王君, 魏保义. 北京市水资源供需平衡分析研究[C]// 河海大学, 安徽省巢湖管理局, 安徽省水利学会. 2019 中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集. 北京: 北京沃特咨询有限公司, 2019: 21-32.
- [12] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Integrated simulation and allocate water resources model WAS (I): principle and build model [J]. Journal of Water Resources, 2015, 49(12): 1451-1459. (in Chinese))
- [13] 桑学锋, 赵勇, 翟正丽, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(II): 应用[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 201-208. (SANG Xuefeng, ZHAO Yong, ZHAI Zhengli, et al. Integrated simulation and allocate water resources model WAS (II): application [J]. Journal of Water Conservancy, 2019, 50(2): 201-208. (in Chinese))
- [14] 洪思扬, 王红瑞, 梁俊芬, 等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))
- [15] 刘寒青, 刘静, 赵建世, 等. 基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 99-105. (LIU Hanqing, LIU Jing, ZHAO Jianshi, et al. Based on the analysis of water resources system sustainable water besides scale[J]. Water Conservation, 2020, 36(6): 99-105. (in Chinese))
- [16] 刘珂伶, 杨柳. 基于能值理论的水资源生态足迹变化特征: 以北京市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 406-414. (LIU Keling, YANG Liu. Characteristics of water resource ecological footprint change based on energy value theory: a case study of Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 406-414. (in Chinese))
- [17] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))
- [18] 董会娟, 耿涌. 基于投入产出分析的北京市居民消费碳足迹研究[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 494-501. (DONG Huijuan, GENG Yong. Research on consumption carbon footprint of Beijing residents based on input-output analysis[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 494-501. (in Chinese))
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO, 1998.
- [20] 宋智渊, 冯起, 张福平, 等. 敦煌 1980—2012 年农业水足迹及结构变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 133-138. (SONG Zhiyuan, FENG Qi, ZHANG Fuping, et al. Characteristics of agricultural water footprint and structural change in dunhuang from 1980 to 2012[J]. Resources and Environment in Arid Regions, 2015, 29(6): 133-138. (in Chinese))
- [21] FALKEN M. Land-water linkages: a synopsis[C] // Land and water integration and river basin management: Proceedings of An FAO Informal Workshop. Rome: FAO, 1995: 15-16.
- [22] 徐宗学, 左德鹏. 拓宽思路, 科学评价水资源量: 以渭河流域蓝水绿水水资源量评价为例[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 12-16. (XU Zongxue, ZUO Depeng. Broaden the thinking and scientifically evaluate the amount of water resources: take the evaluation of blue water and green water resources in Weihe River Basin as an example[J]. Science and Technology of South-to-north Water Diversion and Water Conservancy, 2013, 11(1): 12-16. (in Chinese))
- [23] 刘静, 余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 35-39. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water resources pressure assessment in China based on water footprint theory [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 35-39. (in Chinese))
- [24] 龙爱华, 王浩, 于福亮, 等. 社会水循环理论基础探析 II: 科学问题与学科前沿[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 505-513. (LONG Aihua, WANG Hao, YU Fuliang, et al. Social water cycle theory analysis II: scientific problems and academic frontiers[J]. Journal of Water Conservancy, 2011, 42(5): 505-513. (in Chinese))
- [25] 李月连, 韦严, 黄乐. 基于泰森多边形的那坡县农村居民点空间分布特征研究[J]. 广西城镇建设, 2020(8): 89-91. (LI Yuelian, WEI Yan, HUANG Le. Spatial distribution characteristics of rural residential areas in Napo County based on Tyson polygon[J]. Guangxi Urban Construction, 2020(8): 89-91. (in Chinese))
- [26] 马亚丽, 敖天其, 王汉涛. 泰森多边形距离反比加权法在 BTOPMC 模型中的应用分析[J]. 水利规划与设计, 2019(11): 58-63. (MA Yali, AO Tianqi, WANG Hantao. Application analysis of Tyson polygon inverse distance weighting method in BTOPMC model[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(11): 58-63. (in Chinese))
- [27] 苏心玥, 于洋, 赵建世, 等. 南水北调中线通水后北京市辖区水资源配置的博弈均衡[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(2): 239-251. (SU Xinyue, YU Yang, ZHAO Jianshi, et al. Game equilibrium of water resources allocation between districts of Beijing after the middle route of south-to-north water diversion project is completed [J]. Journal of Applied Foundation and Engineering Science, 2019, 27(2): 239-251. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-12-16 编辑: 骆超)