

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.016

基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析

刘寒青¹, 刘 静¹, 赵建世², 李海红¹, 赵 勇¹, 王丽珍¹, 龙爱华¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 基于水资源系统可持续性评价的基本理论与方法, 分析了不同供水条件和需水方案下北京市2025年水资源系统可持续性和南水北调对北京市未来水资源系统可持续性的影响, 并从可持续性角度确定了不同发展情景下南水北调调水规模的阈值。结果表明: 南水北调可总体改善北京市未来水资源系统可持续性, 但在较高需水方案下或丹江口水库遭遇特枯水年时, 北京市水资源系统可持续性状况不容乐观; 未来应在科学制定需水方案的基础上合理增大南水北调调水规模, 加强应急保障措施和资源战略储备, 提升北京市水资源系统可持续性, 实现首都水资源可持续发展。

关键词: 水资源系统; 南水北调; 调水规模; 可供水量; 需水量; 可持续性评价; 北京

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)06-0099-07

Analysis of water transfer scale of South-to-North Water Diversion Project based on sustainability of water resources system // LIU Hanqing¹, LIU Jing¹, ZHAO Jianshi², LI Haihong¹, ZHAO Yong¹, WANG Lizhen¹, LONG Aihua¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the basic theory and method of water resources system sustainability evaluation, we analyzed the water resources system sustainability of Beijing in 2025 under different water supply conditions and water demand schemes, and studied the impact of South-to-North Water Diversion (SNWD) on the future water resources system sustainability of Beijing, as well as determined the threshold value of water transfer scale of SNWD under different development scenarios from the perspective of sustainability. The results showed that SNWD can improve the future water resources system sustainability of Beijing in general. However, the sustainability of water resources system in Beijing is not optimistic under high water demand schemes or when the Danjiangkou Reservoir encounters an extremely dry year. In the future, we should reasonably increase the water transfer scale of SNWD and strengthen the emergency safeguard measures and strategic reserve of water resources on the basis of scientifically formulating water demand schemes, so as to improve the sustainability of water resources system and realize the sustainable development of water resources in Beijing.

Key words: water resources system; South-to-North Water Diversion; water transfer scale; available water supply; water demand; sustainability evaluation; Beijing

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源, 是社会经济发展的基础支撑^[1]。水资源系统可持续性状态是关系到水资源能否保障社会可持续发展的重要依据, 采用科学合理的评价指标, 定量分析水资源系统的可持续性, 能为缺水地区的水资源综合管理提供科学依据, 对有效规避水资源短缺风险、

促进社会经济可持续发展与生态环境的良性循环具有重要意义^[2-5]。为此, 国内外众多学者围绕水资源系统可持续性开展了大量研究。Loucks^[2]提出可持续的水资源系统是指在设计和管理上能够满足现在和未来的社会目标, 同时保持其生态、环境和水文完整性的系统; 王丽珍等^[6]结合自然、社会、经济和环

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401407); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WR0145B622017); 国家自然科学基金(516009260)

作者简介: 刘寒青(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划与管理。E-mail: hamtsing@126.com

通信作者: 赵勇, 教授级高级工程师。E-mail: zhaoyong@iwhr.com

境系统的可持续性构建了区域水资源可持续性评价指标体系,引入模糊集理论与层次分析法对北京市1989—2008年的水资源系统可持续性进行了评价;郑德凤等^[7]基于水资源可持续度概念,应用压力-状态-响应模型构建了区域水资源系统可持续能力的评价指标体系,采用主成分分析法对辽宁省2003—2013年的水资源系统可持续能力进行了评价;李玉龙等^[8]基于系统协同视角,构建水资源系统可持续发展的协同测度模型,引入社会网络分析方法探讨了北京市2008—2016年的水资源系统可持续发展的协同程度。以往关于水资源系统可持续性的研究多侧重于概念内涵的解析、评价方法及其评价指标体系的构建等,在应用研究方面的视角相对单一,大多为对区域水资源系统的历史与现状可持续性状态进行评价^[9-15],很少有研究对区域未来水资源系统可持续性状态进行预判,将水资源系统可持续性分析与区域水资源安全保障方案等规划研究相结合。鉴于此,本文基于水资源供需平衡分析对区域未来水资源系统可持续性状态进行评估,并从水资源系统可持续性的角度探讨区域未来水资源安全保障问题,以拓展水资源系统可持续性研究的应用,丰富水资源安全保障方案研究的视角。

北京属于水资源严重短缺的特大城市,自20世纪50年代以来,多次出现严重的水危机^[16]。为保障北京市供水安全,2014年12月南水北调中线工程正式通水,平均每年向北京市供水10.5亿 m^3 ,初步缓解了北京市的缺水状况。然而,随着北京市人口的持续上升、经济的快速发展以及生态建设目标的不断提高,城市需水逐年攀升,而本地水资源条件难以得到改善,水资源供需矛盾日益突出,北京市未来水资源安全保障形势依然严峻^[17]。因此,分析北京市水资源供需平衡并对北京市未来水资源系统可持续性做出合理的评价,对于北京市水资源综合管理、南水北调工程的规划与调整具有十分重要的现实意义。本文在考虑水资源系统不确定性和复杂性的基础上,针对北京市2025年多种人口发展与生态建设情景,研究不同水资源供需方案下北京市水资源系统的可持续性及其与南水北调规模的关系,以期为北京市需水管理与南水北调后续工程规划提供参考。

1 水资源系统可持续性评价指标

目前国际上最具权威性、代表性的水资源系统可持续性评价指标是由Loucks提出、Sandoval-Solis改进的可持续性指数 I_s ,它是衡量水资源系统可持续性的综合指标,主要基于可靠性、弹性和脆弱性等

性能指标,在充分考虑水资源短缺和气候变化的条件下突出强调水资源系统的适应能力,可用于评估和比较不同供需情景下的水资源综合管理方案,尤其适用于水文变化与气候变化条件下的水资源系统可持续性评价^[2,18-19]。

a. 可靠性 D 是与水资源短缺风险相对的概念^[20],为模拟期内(长时间系列)可供水量满足需水量的概率,可表示为需水得到满足的年份数与模拟期总年份数之比:

$$D = \frac{T_e}{T} \quad (1)$$

式中: T_e 为不发生缺水的年份数; T 为模拟期总年份数。计算某年份的可靠性指数时将该年份的需水量与模拟期内各年份可供水量进行比较,可供水量满足需水量的年份数与总年份数之比即为该年份的可靠性指数。

b. 弹性 R 是模拟期内不发生连续缺水的概率,表征水资源系统从缺水状态恢复到正常状态的能力:

$$R = 1 - \frac{N}{T} \quad (2)$$

其中

$$N = m - n$$

式中: N 为连续2年缺水的次数; m 为连续缺水时段的总年份数; n 为模拟期内连续缺水时段数(连续缺水年份为2年或以上的时段)。

c. 脆弱性 V 代表模拟期内系统平均缺水程度,可表示为平均缺水量与需水量之比:

$$V = \frac{\sum_{t=1}^T S_t / T_d}{X} \quad (3)$$

式中: T_d 为发生缺水的年份数; S_t 为模拟期内年份 t 的缺水量; X 为需水量。某年份的脆弱性指数即为模拟期的平均缺水量与该年份的需水量之比。

可持续性指数 I_s 可表示为可靠性、弹性和脆弱性3个指标的几何平均值,能综合反映水资源系统的稳定性与恢复调节能力^[18]:

$$I_s = [DR(1 - V)]^{1/3} \quad (4)$$

2 北京市未来水资源系统可持续性分析

2.1 水资源供需分析

2.1.1 水资源需求

水资源需求分析包括生活、工业、农业、生态需水预测4个方面。考虑北京市未来人口规模与城市生态建设的不确定性,在进行生活、生态需水预测时设置了不同人口发展情景与生态建设目标,不同需水方案下北京市2025年需水预测结果如表1所示。

表1 北京市2025年需水预测

Table 1 Water demand forecast of Beijing in 2025

| 需水方案 | 生态目标 | 人口规模/万人 | 需水量/亿 m ³ | | | | |
|------|------|---------|----------------------|------|------|-------|-------|
| | | | 生活 | 工业 | 农业 | 生态 | 合计 |
| I | 低方案 | 2300 | 18.47 | 3.56 | 4.93 | 18.19 | 45.15 |
| II | 低方案 | 2500 | 20.08 | 3.56 | 4.93 | 18.32 | 46.89 |
| III | 中方案 | 2300 | 18.47 | 3.56 | 4.93 | 21.49 | 48.45 |
| IV | 中方案 | 2500 | 20.08 | 3.56 | 4.93 | 21.62 | 50.19 |
| V | 高方案 | 2300 | 18.47 | 3.56 | 4.93 | 25.19 | 52.15 |
| VI | 高方案 | 2500 | 20.08 | 3.56 | 4.93 | 25.32 | 53.89 |

a. 生活需水。生活需水预测采用定额法。考虑北京市2025年人口的不确定性,共设置两种人口发展情景,情景1为实施人口严控政策下的人口发展,根据《北京城市总体规划(2016—2035年)》(以下简称《总体规划》)设定情景1的人口规模为2300万人;情景2为人口自然发展状态,基于北京市2001—2016年的人口统计数据,采用灰色 Verhulst 模型进行人口预测^[21],据此设定情景2的人口规模为2500万人。参考《北京市“十三五”时期节水型社会建设规划》与北京市节水型区创建指标标准中对于人均生活用水量的设定,北京市2025年人均生活用水定额采用220 L/d。两种人口发展情景下的生活需水量分别为18.52亿 m³和20.13亿 m³。

b. 工业需水。依据《总体规划》《北京市“十三五”时期水资源保护与利用规划》和《北京市“十三五”时期工业转型升级规划》的要求,以现状实际用水为基础,按照工业用新水零增长、合理增加工业利用再生水量和疏解高耗水工业的规划,预测北京市2025年万元工业增加值用水量为7.2 m³,工业需水量稳定控制在3.56亿 m³。

c. 农业需水。参考《北京市“十三五”时期水资源保护与利用规划》,采用定额法预测北京市2025年农业需水量为4.93亿 m³。

d. 生态需水。生态需水即人工生态环境补水,主要包括河湖沼泽补水、生态林草需水、城镇绿地需水和环境卫生需水。分析河湖沼泽生态环境需水时,考虑河湖改善的不同目标,以《总体规划》为基础分别设置了初步修复(低方案)、景观良好(中方案)、生态健康(高方案)3个生态建设目标方案,3种方案下的河湖沼泽生态环境需水量分别为15.48亿 m³、18.78亿 m³和22.48亿 m³;依据《总体规划》和《北京市“十三五”时期水资源保护与利用规划》,生态林草需水主要指百万亩造林工程等需水1.22亿 m³;两种人口规模下的城镇绿地需水和环境卫生需水分别为1.62亿 m³和1.49亿 m³。综合可得不同情景方案下的生态需水量为18.19亿~25.32亿 m³。

2.1.2 可供水量

北京市的可供水水源主要考虑本地地表水、本地地下水、再生水和南水北调水。在进行北京市2025年可供水量分析时,地下水、再生水可供水量可根据相关规划规定设为定值,而地表水可供水量与南水北调水可供水量由于受北京本地与丹江口水库来水条件的影响而具有不确定性。

a. 本地地表水。本地地表水可供水量受北京本地来水条件影响,由于未来来水不确定,北京市2025年地表水可供水量也是不确定的。本文以历史来水条件(1956—2018年)作为未来可能发生的状况,考虑下垫面、气候条件等变化对降水与地表水资源量之间关系的影响,对1956—2018年地表水资源量进行系列一致性分析。由图1可知,同量降水条件下,2000年前后时段地表水资源量相差较大,说明下垫面条件变化对地表水资源量影响较大,为更准确反映现状下垫面情况下的地表水资源量,本文对2000年以前的地表水资源量进行一致性修正。由于北方地区水资源短缺,地表水资源开发利用率应维持在60%~70%范围之内^[22-23],考虑北京市未来建设国际一流和谐宜居之都对生态环境质量改善的总体目标,用于河道内生态环境的用水量应相对较大,地表水资源开发利用率可取较低值60%,故本文以修正后地表水资源量的60%作为地表水可供水量,从而生成北京市2025年地表水可供水量的系列值。

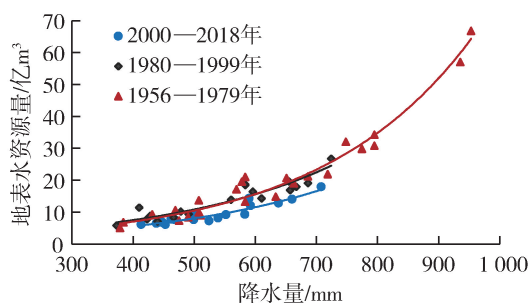


图1 北京市降水量与地表水资源量关系

Fig. 1 The relation between the amount precipitation and surface water resources in Beijing

b. 本地地下水。本地地下水由于近年来超采严重,储存水量亏损,近期地下水以丰补欠作用难以发挥,因此按照不利情况做好水源供给准备,其可供水量取近期枯水年条件下的可供水量17亿 m³。

c. 再生水。随着城市废污水处理能力和处理标准的提高,再生水已成为北京市主要供水水源之一。2018年,北京市污水排放总量20.4亿 m³,污水处理率93.4%,再生水利用量10.8亿 m³,未来随着城市用水量的增加和污水处理率的提高,再生水的

生成量还将有所增加。结合《总体规划》中 2020 年污水处理率要提高到 95%、再生水利用量不少于 12 亿 m³的要求,本文将北京市 2025 年再生水可供水量确定为 15 亿 m³。

d. 南水北调水。考虑南水北调水可供水量受丹江口水库来水不确定的影响,本文在分析这一部分可供水量时考虑了丹江口水库来水频率为 50%、75%、95% 以及无南水北调水 4 种供水条件(以下在图表中简称为“50%、75%、95%、无调水”),依据南水北调中线一期工程的规划设计,各频率下的可供水量依次为 10.5 亿 m³、9.5 亿 m³和 6.8 亿 m³。

综上所述,可得出北京市 2025 年 4 种供水条件、6 种需水方案下的水资源供需情况。由于未来北京本地来水的不确定性,本文将根据历史水文系列(1956—2018 年)计算的地表水可供水量系列值作为北京市 2025 年可能获得的 63 种地表水供水量,因此每种供水条件对应一组可供水量系列值(即 63 个值)。在进行北京市 2025 年水资源供需平衡分析时,将各种需水方案下北京市 2025 年的需水预测值与各种供水条件下的可供水量系列值进行逐一比较,进而基于水资源供需平衡分析计算水资源系统可持续性评价指标。这种充分考虑水文系统不确定性和波动性的分析方法,更能体现水资源可持续性的内涵,即水资源系统在应对环境变化时的适应能力。

2.2 水资源系统可持续性评价

对北京市 2025 年水资源系统可持续性进行评

价,分析不同供水条件和需水方案下北京市未来水资源安全保障形势。基于北京市 2025 年水资源供需平衡分析,采用水资源系统可持续性评价指标,计算得到不同供水条件与需水方案下北京市 2025 年水资源系统可靠性、弹性、脆弱性,进而得到水资源系统可持续性指数,计算结果如表 2 所示。

为了直观表明水资源系统可持续性状态,利用 Quick Cluster 过程(快速样本聚类)对表 2 中各指标进行聚类^[24],划定“好、较好、中等、较差、差”5 类评价等级(等级划分标准见表 3),不同供水条件与需水方案下北京市 2025 年水资源系统可靠性、弹性、脆弱性与可持续性的等级情况如图 2 所示。由图 2 可以看出,在无南水北调水的情况下,各种需水方案下各类评价指标等级均为“差”,南水北调水进京后,北京市未来水资源系统可持续性总体有所改善,但在较高需水方案下或丹江口水库遭遇特枯水年时,北京市水资源系统可持续性状况普遍不好,其中水资源系统可靠性在 3 类分项指标中表现相对更差,且对水资源系统可持续性状态影响较大,表明水资源短缺风险是影响北京市未来水资源系统可持续性较为关键的因素。

从不同需水方案来看,不同人口规模对水资源系统可持续性的影响相对较小,即方案 I 与 II、III 和方案 IV、V 与 VI 的各类指标等级相差较小,而不同生态建设方案对水资源系统可持续性的影响较大,即方案 I、III、V 之间以及方案 II、IV、VI 之间各类指标

表 2 北京市 2025 年水资源系统可持续性指标

Table 2 Sustainability indicators of water resources system in Beijing in 2025

| 需水 方案 | 可靠性 | | | | 弹性 | | | | 脆弱性 | | | | 可持续性指数 | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|
| | 50% | 75% | 95% | 无调水 | 50% | 75% | 95% | 无调水 | 50% | 75% | 95% | 无调水 | 50% | 75% | 95% | 无调水 |
| I | 0.98 | 0.90 | 0.45 | 0.06 | 1.00 | 0.98 | 0.66 | 0.11 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.16 | 0.99 | 0.96 | 0.66 | 0.18 |
| II | 0.73 | 0.58 | 0.32 | 0.03 | 0.92 | 0.77 | 0.53 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.18 | 0.87 | 0.76 | 0.54 | 0.12 |
| III | 0.42 | 0.32 | 0.15 | 0.03 | 0.65 | 0.56 | 0.27 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.23 | 0.64 | 0.56 | 0.33 | 0.12 |
| IV | 0.23 | 0.15 | 0.08 | 0.03 | 0.40 | 0.27 | 0.15 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.12 | 0.25 | 0.44 | 0.33 | 0.22 | 0.12 |
| V | 0.15 | 0.11 | 0.03 | 0.03 | 0.27 | 0.21 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.11 | 0.15 | 0.28 | 0.33 | 0.28 | 0.12 | 0.11 |
| VI | 0.08 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.15 | 0.10 | 0.06 | 0.03 | 0.12 | 0.13 | 0.18 | 0.30 | 0.22 | 0.16 | 0.12 | 0.07 |

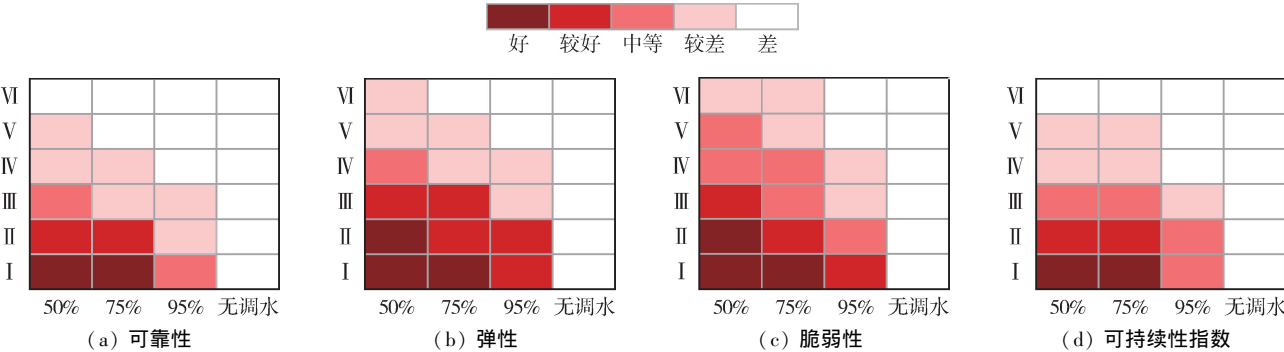


图 2 北京市 2025 年水资源系统可持续性评价

Fig. 2 Sustainability evaluation of water resources system in Beijing in 2025

表3 可持续性指标评价等级划分
Table 3 Evaluation grade classification
of sustainability indicators

| 评价等级 | 可靠性 | 弹性 | 脆弱性 | 可持续性指数 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 好 | [0.80,1] | [0.80,1] | [0,0.02) | [0.90,1] |
| 较好 | [0.55,0.80) | [0.50,0.80) | [0.02,0.06) | [0.70,0.90) |
| 中等 | [0.35,0.55) | [0.30,0.50) | [0.06,0.10) | [0.50,0.70) |
| 较差 | [0.15,0.35) | [0.15,0.30) | [0.10,0.15) | [0.25,0.50) |
| 差 | [0,0.15) | [0,0.15) | [0.15,1] | [0,0.25) |

等级相差相对较大。这主要是因为北京市人口发展已经进入缓慢增长甚至停滞不前的状态,人口自然发展状态与人口严控政策下的人口规模相差不大,因而不同人口发展情景下北京市未来水资源系统可持续性状态相差不大;而在当前生态文明建设的背景下,不同生态建设发展阶段的生态需水差异较大,因此未来北京市水资源系统可持续性状态能否支撑高目标生态建设是一个值得关注的问题。在当前南水北调中线一期工程调水规模下,北京市2025年水资源系统可持续性仅在低目标生态建设方案下可达到“较好”或“好”的状态,而在高目标生态建设方案下处于“差”或“较差”的状态,说明南水北调现有调水规模难以很好地支撑北京市未来高目标生态建设。若要满足北京市未来建设国际一流和谐宜居城市对生态用水的需求,保障较高需水方案下北京市2025年水资源系统的可持续性,则需进一步增大南水北调调水规模。因此,未来应在科学制定需水方案的基础上合理增大南水北调调水规模,提升北京市水资源安全保障能力,实现首都水资源可持续发展。

从3种不同南水北调供水条件来看,南水北调调出区来水的丰枯情况对北京市水资源系统可持续性会产生较大的影响,尤其是当丹江口水库来水频率为95%时,北京市水资源系统可持续性指标 I_s 出现了降级,且无论未来在何种需水方案下,北京市水资源系统可持续性都无法达到“较好”或“好”的状态,这一方面体现了南水北调水在北京市水资源安全保障中的重要性,同时也可在一定程度上反映出北京市供水对南水北调水的依赖性,且这种依赖性势必会随着南水北调供水占比的增加而增强,因此在考虑增大北京市未来南水北调调水规模时,应注意提升承接调蓄南水北调水的能力,加强水资源应急保障措施,提高应急和战略储备能力,以保障丹江口水库遭遇特殊干旱期时北京市的供水安全。

3 南水北调调水规模分析

南水北调是解决北京市水资源短缺问题的重要措施^[14,25],而由上文分析可知南水北调现有调水规模难以使北京市未来在较高需水方案下达到水资源

系统可持续性较好的状态,因此需进一步分析南水北调调水规模对北京市未来水资源系统可持续性的影响。图3为不同需水方案下北京市2025年水资源系统可持续性随南水北调调水规模的变化情况,水资源系统可持续性达到不同状态时南水北调调水规模阈值如表4所示。

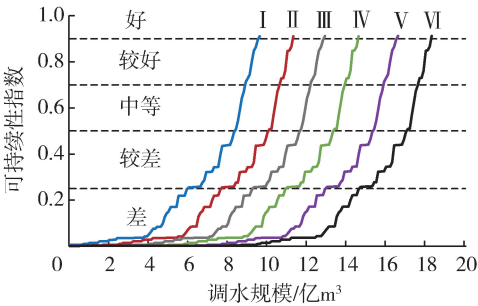


图3 南水北调调水规模与北京市2025年水资源系统可持续性关系

Fig.3 The relation between the scale of SNWD and the sustainability of water resources system in Beijing in 2025

表4 北京市2025年南水北调调水规模阈值

Table 4 The threshold value of the scale of SNWD in Beijing in 2025

| 需水方案 | 不同评价等级对应的南水北调调水规模阈值/亿 m ³ | | | |
|------|--------------------------------------|------|------|------|
| | 好 | 较好 | 中等 | 较差 |
| I | 9.6 | 8.9 | 8.4 | 6.0 |
| II | 11.3 | 10.7 | 10.1 | 7.7 |
| III | 12.9 | 12.2 | 11.7 | 9.3 |
| IV | 14.6 | 14.0 | 13.4 | 11.0 |
| V | 16.6 | 15.9 | 15.4 | 13.0 |
| VI | 18.3 | 17.7 | 17.1 | 14.7 |

研究结果表明,当南水北调调水规模为9.6亿 m³时,即可保证2025年北京市在最低需水方案(方案I)下达到水资源系统可持续性“好”的状态,说明南水北调中线一期工程的调水能力能满足北京市2025年的最低需水方案,但不能使其他需水方案达到水资源系统可持续性“好”的状态;当南水北调调水量大于16.6亿 m³时,即可保证实施人口严控政策、高目标生态建设方案(方案V)下北京市2025年水资源系统可持续性达到“好”的状态,而南水北调中线一期工程现有调水能力只能使该需水方案下的水资源系统可持续性处于“差”的状态,说明未来需要进一步增大南水北调调水规模来保障高目标生态建设方案下北京市水资源系统的可持续性;当人口发展突破严控规模且实施高目标生态建设方案(方案VI)时,则需将南水北调调水量提高至18.3亿 m³才能保证在最高需水方案下水资源系统可持续性达到“好”的状态,因此在研究南水北调调水规模时,应考虑工程实际情况制定合理的需水方

案,对人口发展及生态建设作出科学的规划。此外,由图3可以看出,当水资源系统可持续性处于“差”或“较差”状态时,水资源系统可持续性指数随调水规模的增大呈现缓慢增大的趋势,当水资源系统可持续性达到“中等”状态后,调水规模增加1.2亿 m^3 则可使水资源系统可持续性达到“好”的状态,即在水资源系统可持续性处于“中等”水平时,增加少量南水北调调水量即可使水资源系统可持续性发生质的飞跃,相关决策者在进行南水北调后续工程规划时可充分考虑这一特性。

4 结 语

本文基于水资源系统可持续性评价方法研究北京市南水北调调水规模,从水资源系统可持续性的角度探讨北京市未来水资源安全保障,与传统的水资源保障方案研究相比,不只是考虑未来某一时期的水资源供需平衡,更多地考虑了水资源系统在不确定条件下的可持续发展状况,因此,本研究可为支撑北京市社会经济可持续发展的水资源保障方案研究提供一个新视角。另需强调的是,实际南水北调调水规模与水资源保障方案的研究需要考虑的现实因素非常复杂,本研究主要从思考角度与定性认识上为北京市未来需水管理与南水北调后续工程规划提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] 左其亭,张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报,2015,46(4):387-395. (ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(4):387-395. (in Chinese))
- [2] LOUCKS D P. Quantifying trends in system sustainability[J]. Hydrological Sciences Journal,1997,42(4):513-530.
- [3] 郝光玲,王烜,罗阳,等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护,2017,33(6):27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model[J]. Water Resources Protection,2017,33(6):27-31. (in Chinese))
- [4] 万文华,尹骏翰,赵建世,等. 南水北调条件下北京市供水可持续评价[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):62-69. (WAN Wenhua, YIN Junhan, ZHAO Jianshi, et al. Sustainability evaluation of Beijing water deployment model before and after South-to-North Water Diversion[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2016,14(2):62-69. (in Chinese))
- [5] 金菊良,董涛,郦建强,等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展,2018,29(1):31-39. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards[J]. Advances in Water Science,2018,29(1):31-39. (in Chinese))
- [6] 王丽珍,黄跃飞,王光谦. 基于不确定性的区域水资源可持续性评价[J]. 水力发电学报,2013,32(6):83-91. (WANG Lizhen, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Sustainability assessment on regional water resources system under uncertainties[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(6):83-91. (in Chinese))
- [7] 郑德凤,张雨,魏秋蕊,等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护,2016,32(3):24-32. (ZHENG Defeng, ZHANG Yu, WEI Qiurui, et al. Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition[J]. Water Resources Protection,2016,32(3):24-32. (in Chinese))
- [8] 李玉龙,韦雅尹,李桂君,等. 协同视角下的北京市水资源系统可持续性评价[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(3):71-80. (LI Yulong, WEI Yayin, LI Guijun, et al. Sustainability evaluation of water resource system in Beijing City from a synergized perspective[J]. China Population, Resources and Environment,2019,29(3):71-80. (in Chinese))
- [9] 陈宁,张彦军. 水资源可持续发展的概念、内涵及指标体系[J]. 地域研究与开发,1998,17(4):37-39. (CHEN Ning, ZHANG Yanjun. Concept, connotations and index system of water resources sustainable development[J]. Areal Research and Development,1998,17(4):37-39. (in Chinese))
- [10] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1441-1452. (WANG Ren, CHEN Ying, CHEN Xingwei. Establishment of indicators system for sustainability assessment of regional water resources use[J]. Journal of Natural Resources,2014,29(8):1441-1452. (in Chinese))
- [11] 王壬,陈兴伟,陈莹. 区域水资源可持续利用评价方法对比研究[J]. 自然资源学报,2015,30(11):1943-1955. (WANG Ren, CHEN Xingwei, CHEN Ying. Comparison of assessment methods for regional water resources sustainable utilization[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(11):1943-1955. (in Chinese))
- [12] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):104-108. (LI Bingyao, CHEN Xing, ZHOU Zhicai, et al. Evaluation on sustainable utilization of water resources in the water shortage region and countermeasure discussion[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,28(6):104-108. (in Chinese))
- [13] 杜阳,武鹏林. 基于 DPSIR-PCA 的山西省水资源可持续性评价[J]. 人民黄河,2019,41(4):42-45. (DU Yang, WU Penglin. Sustainability evaluation of water resources in Shanxi Province based on DPSIR-PCA[J]. Yellow River,2019,41(4):42-45. (in Chinese))

- Yang, WU Penglin. Evaluation of water resources sustainability based on DPSIR-PCA model in Shanxi Province[J]. Yellow River, 2019, 41 (4): 42-45. (in Chinese))
 - [14] 胡林凯,崔东文. 基于 SBO-PP 模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济, 2017, 35(5): 7-11. (HU Linkai, CUI Dongwen. Evaluation model for sustainable development capacity of water resources based on SBO-PP model and its application[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5): 7-11. (in Chinese))
 - [15] 马海良,李珊珊,侯雅如. 河北省城镇化与水资源系统的耦合协调及预测[J]. 水利经济, 2017, 35(3): 37-41. (MA Hailiang, LI Shanshan, HOU Yaru. Coupling coordination and forecast of urbanization and water resource system in Hebei Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(3): 37-41. (in Chinese))
 - [16] 刘晓,王红瑞,俞淞,等. 南水北调进京后的北京市水资源短缺风险研究[J]. 水文, 2015, 35(4): 55-61. (LIU Xiao, WANG Hongrui, YU Song, et al. Study on water resources risk in Beijing after "South-North Water Transfer" Project[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(4): 55-61. (in Chinese))
 - [17] 刘江侠. 北京市未来供水保障方案探讨[J]. 海河水利, 2018(3): 4-7. (LIU Jiangxia. Discussion on Beijing's future water supply protection plan [J]. Haihe Water Resources, 2018(3): 4-7. (in Chinese))
 - [18] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability index for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(5): 381-390.
 - [19] HASHIMORO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
 - [20] 刘大根,赵建世. 特大城市水资源系统可持续性分析: 以北京市为例[J]. 中国水利, 2017(23): 24-28. (LIU Dagen, ZHAO Jianshi. Evaluation of sustainability of water resources system of megacities: a case study of Beijing Municipality[J]. China Water Resources, 2017(23): 24-28. (in Chinese))
 - [21] 刘呈玲,方红远,刘志辉. 改进的灰色预测模型在区域用水总量预测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 57-62. (LIU Chengling, FANG Hongyuan, LIU Zhihui. Application of grey system model in prediction of regional water consumption [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 57-62. (in Chinese))
 - [22] 王西琴,张远. 中国七大河流水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 500-506. (WANG Xiqin, ZHANG Yuan. The allowable exploitation rate of rivers water resources of the seven major rivers in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 500-506. (in Chinese))
 - [23] 钱正英. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
 - [24] 李伟,程利涛. 一种改进的快速 K-近邻分类方法[J]. 现代计算机: 专业版, 2015(35): 14-17. (LI Wei, CHENG Litao. An improved speeding K-nearest neighbor classification method [J]. Modern Computer, 2015(35): 14-17. (in Chinese))
 - [25] 苏心玥,于洋,赵建世,等. 南水北调中线通水后北京市辖区间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 analysis of trans-regional water resources allocation in Beijing [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(2): 239-251. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-09-05 编辑: 熊水斌)

(上接第 98 页)

 - [24] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 37-45. (CHEN Guangzhao, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, et al. Xixian New Area numerical simulation of rainfall spatial inconsistency effects on flood inundation process [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 37-45. (in Chinese))
 - [25] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 13-18. (in Chinese))
 - [26] 王兴桦,侯精明,李丙尧,等. 多孔透水砖下渗衰减规律试验研究[J]. 给水排水, 2019, 55(增刊 1): 68-71. (WANG Xinghua, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Experimental research on the law of permeability decline of porous permeable bricks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(Sup 1): 68-71. (in Chinese))
 - [27] 侯精明,李钰茜,同玉,等. 植草沟径流调控效果对关键设计参数的响应规律模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 18-28. (HOU Jingming, LI Yuxi, TONG Yu, et al. Simulation of response law for control effect of runoff control at grass swale to key design parameters [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 18-28. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-12-30 编辑: 王芳)