



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.02.012

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]. 2016, 14(2): 62-69.

WAN Wen hua, YIN Jun han, ZHAO Jian shi, et al. Sustainability evaluation of Beijing water deployment model before and after South to North Water Diversion[J]. 2016, 14(2): 62-69. (in Chinese)

南水北调条件下北京市供水可持续评价

万文华¹, 尹骏翰^{1,2}, 赵建世¹, 雷晓辉³, 廖卫红³, 秦 韬³

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 韩国水资源公社, 韩国 大田 300711;

3. 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)

摘要: 北京市水资源危机已经成为约束城市社会发展的重要因素, 南水北调中线正式通水后, 可以为北京每年平均配水 10 亿 m³。以北京市供水系统为研究对象, 全面收集全市的供需水及供水配置情况, 建立水资源配置 WEAP 模型, 模拟了四种方案, 分析评价不同来水情况下 2020 年北京市供水可持续性, 并对供水配置网络做出了适当的修改。研究表明, 南水北调中线工程可以显著改善北京市缺水情况, 修改后的供水配置网络更利于各类水源的综合利用, 保证北京市供水可持续性。

关键词: 南水北调; 供水系统配置; 用水户; 方案模拟; 可持续性评价

中图分类号: TV 213. 4; TV 674 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0062-08

Sustainability evaluation of Beijing water deployment model before and after South to North Water Diversion

WAN Wen hua¹, YIN Jun hua^{1,2}, ZHAO Jian shi¹, LEI Xiao hui³, LIAO Wei hong³, QIN Tao³

(1. State Key Laboratory of Hydro science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Korea Water Resources Corporation, Daejeon 300711, South Korea; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Hydropower and Water Resources, Beijing 100038, China

Abstract: Water scarcity has been a major constraint for both social and economic development in Beijing. When the middle route of the nation's enormous South to North Water Diversion (SNWD) project began to supply the water, it is supposed that more than one billion cubic meters of water will be diverted into Beijing annually. This paper focuses on quantitatively evaluating the relative sustainability of Beijing water supply system before and after SNWD project. The four alternative water resources deployment scenarios are considered for the assessment of sustainability in 2020, using the Water Evaluation and Planning System (WEAP) software, the existed water demand and also the supply data of Beijing. The sustainability indices are presented for each scenario, and two of those alternatives are proposed to enhance the sustainability of entire water supply system. Our results showed that the SNWD could significantly contribute to the relief of the water scarcity, and the proposed alternatives will be more beneficial in terms of comprehensive water resources utilization, thus eventually ensure a sustainable water supply in Beijing.

Key words: South to North Water Diversion; water resources deployment; water users; scenario simulation; sustainability

收稿日期: 2015-04-18 修回日期: 2015-12-16 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1500.026.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07205); 水利部公益性行业科研专项经费项目(20131102; 201301001); 北京市科技计划课题(Z141100006014049)

Fund: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China(2012ZX07205); Governmental Public Industry Research Special Funds for Projects (20131102; 201301001); Beijing Municipal Science and Technology Project (Z141100006014049)

作者简介: 万文华(1990-), 女, 江西上饶人, 博士, 主要从事水资源管理、水库调度方面的研究。E-mail: meviolet@126.com

区域供水的可持续性关系到水资源能否为社会可持续发展提供保障的重要依据,建立科学、合理、实用的评价指标,定量评价水资源系统的持续性,能够为缺水地区水资源管理决策提供科学依据,为可持续发展提供保障^[12]。Loucks^[3]将可持续水资源系统定义为“通过规划和管理,能够完全服务于现在和未来社会的目标,同时保持其生态、环境以及水文完整性的系统”。

在采用水资源风险评估对水资源系统持续性的量化研究方面,已有学者做了大量工作。对于确定风险评价指标,国内学者多集中在供水可靠性^[4]、可恢复性^[5]、易损性^[6]以及重现期、风险度^[7]等指标,这些指标的选取具有一定的区域局限性。而Loucks^[3]选取可靠性、弹性、脆弱性等3个性能指标定义了持续性指数(Sustainability Index),量化了水资源系统持续性。在此基础上,Sandoval Solis^[8]等增加了均方差、最大缺水率这2个性能指标,对持续性指标在内容结构上进行改善,提出了适用于不同水资源系统的持续性指标,可用于分析比较不同水资源管理方案下用水群的持续性,识别存在供水风险的区域。改进后的持续性评价指标更具灵活性和适用性,对管理者的规划和决策具有重要意义^[9]。

北京市属资源性重度缺水地区,多年平均降雨量585 mm(1956年-2000年系列),年均降水总量98.28亿 m³^[10],人均水资源量不足300 m³,远远低于国际人均1 000 m³的缺水下限。上游水库的拦蓄及下垫面变化导致地面产流减少^[11,12],加之气候变化的影响,入境水量逐年降低。以密云水库为例,近30年入库水量日益减少^[13],建设任务也从初建时以防洪、灌溉发电为目标退化为城市供水。同时,由于地表水过度开发,地下水严重超采,造成水储量累积亏损,地面下沉,生态恶化,城乡供水出现全面紧张的态势,局部地区的水污染形势更是进一步加剧了水资源的短缺^[14]。

2014年12月12日,南水北调中线正式通水,预计北京每年将接纳10亿 m³的来水,同时,随着北京市人口的急剧上升和经济的快速发展,未来城市需水也将逐年攀升,本地水资源的承载力必将无法满足要求。如何实现南水在北京市的合理配置,使之与本地水资源高效配合,保证城市生活及工业需水,改善生态环境,对北京市可持续发展至关重要。本次研究拟在既有水资源配置网络基础上,建立供水WEAP模型,研究南水北调2020年来水前后北京市供水系统的风险,对北京市不同城区不同用水户的供水情况做出评价,并对水资源配置情况提出建议。

1 可持续性评价指标

可持续性指标是衡量供水系统持续性的综合指标,它从用户及群体角度出发,在可靠性、弹性、脆弱性、最大缺水率4个性能指标中合理选取,建立相应的可持续性指标,评价水资源系统的可持续性^[8,9]。

可靠性是指经过长时段模拟,系统供水量满足需水的概率,对于时段 t 第 i 个用水户,其可靠性是供水满足时段数与整个运行期时段数 n 之比:

$$Rel_i = \frac{N_{D_{i,t}=0}}{n} \quad (1)$$

其中,定义缺水量

$$D_{i,t} = \begin{cases} X_{D_{i,t}} - X_{S_{i,t}} & X_{D_{i,t}} > X_{S_{i,t}} \\ 0 & X_{D_{i,t}} = X_{S_{i,t}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_{D_{i,t}}$ 为需水量; $X_{S_{i,t}}$ 为实际供水量。

弹性是指系统从缺水状态恢复到正常状态的能力,为系统从缺水状态恢复到正常状态的时段数与整个缺水状态时段数之比:

$$Res_i = \frac{N_{D_{i,t} > 0, D_{i,t+1} = 0}}{N_{D_{i,t} > 0}} \quad (3)$$

脆弱性是指系统发生缺水的严重程度,可用缺水量的平均值表示,也可表示为平均缺水量与年需水量之比,本文采用第二种:

$$Vul_i = \frac{(\sum_{t=0}^{t=n} D_{i,t}) / N_{D_{i,t} > 0}}{W_i} \quad (4)$$

最大缺水率是指系统处于缺水状态时的最坏情况,可用最大年缺水量与年需水量之比表示:

$$Maxd_i = \frac{\max D_i}{W_i} \quad (5)$$

可持续性指数表示第 i 个用水户上述4个指标的几何平均值:

$$SI_i = [\prod_{m=1}^M C_{i,m}]^{1/M} = [Rel_i \cdot Res_i \cdot (1 - Vul_i) \cdot (1 - Maxd_i)]^{1/4} \quad (6)$$

式中: $C_{i,m}$ 为性能指标; M 为指标个数, $M=4$ 。

群持续性指数定义为各用水户持续性指数的加权平均值。对于第 k 个用户群,其群持续性指数为

$$SG_k = \sum_{j=1}^J \frac{W_{i,j}}{W_k} \cdot SI_{i,j} \quad (7)$$

式中: $W_{i,j}$ 为用户群 k 中第 i 个用水户的年需水量; W_k 为用户群 k 的年总需水量。 SG 与 SI 的取值区间均为0~1,越趋于1,表明该群体或个体的持续性越高。

2 水资源配置模型

2.1 供需水条件

根据《北京市水资源公报》^[15],2003年以来,北

京市地表水的供水量基本维持稳定,但各水源比例却有明显变化:地下水开采量逐年递减;南水北调工程由 2008 年开始向北京供水,呈逐年上升趋势;再生水的利用量也逐年增加,10 年内上升了 266%(图 1)。1980 年以来,北京市经济规模和人口规模发生巨大变化的同时,北京市的用水结构和数量也发生的剧烈的变化(1990 年开始统计,图 2),表现为:农业用水量下降趋势明显,从 1990 年的 21.74 亿 m³ 下降至 2012 年的 9.3 亿 m³,下降了 57%;工业用水量总体呈现下降趋势;生活用水和环境用水则呈现快速增长势头,生活用水量 1999 年超过了工业用水量,2005 年超过了农业用水量成为北京市第一用水大户。生态环境用水量从 1996 年开始统计,此后呈逐年攀升趋势,2012 年与工业用水量持平^[15]。

三种不同的方法推测北京市未来 10 年(2010 年-2020)的用水量最大值在 40 亿 m³ 左右。本文采用“十二五”相关规划作为 2020 年的需水预测成果,则北京市总需水量为 41.07 亿 m³。全市及各区的需水成果详见表 1。

表 1 北京市各区县 2020 年需水预测

Tab.1 Water demand prediction in each district of Beijing

10 ⁶ m ³					
序号	单位名称	工业生活	农业生活	生态环境	需水总量
1	城六区	1 460	0	330	1 790
2	门头沟区	33	9	12	54
3	房山区	183	161	18	362
4	大兴区	99	287	11	397
5	通州区	138	244	20	402
6	顺义区	138	214	23	375
7	平谷区	28	73	24	125
8	密云县	41	42	25	108
9	怀柔区	48	37	25	110
10	延庆县	26	51	5	82
11	昌平区	186	81	35	302
合计		2 380	1 199	530	4 107

北京市城市供水由四部分组成,第一部分为自来水系统,为城市生活及仪表工业供水;第二部分为分散的农业井、自备井等地下取水系统;第三部分为京密引水渠、永定河引水渠为骨干的地表水供水系统;第四部分为南水北调中线自丹江口的调水。

地表水源有 5 个,包括潮河、白河、蓟运河、拒马河和永定河。其中,除拒马河外,其他水源直接汇入水库,由水库节点控制,依次为密云水库、白河堡水库、海子水库及官厅水库。密云水库多年供水占总地表水供水量的 60% 以上,计算采用 1981 年-1995 年潮白河入流序列为密云水库的输入,见表 2,其他水库的入流量采用多年平均入流情况^[17-19],见表 2。

表 2 各水库多年平均来水

Tab.2 Average annual runoff of each reservoir

亿 m ³					
水库	海子水库	怀柔水库	官厅水库	白河堡水库	密云水库
总库容	1.21	1.44	41.60	0.91	43.75
年均来水量	1.10	0.71	3.00	1.27	3.95

地下水源原有 16 个,包括 11 个区域用户的本地地下水水源地,怀柔、平谷、马池口、张坊 4 个应急水源地和顺义八厂水源地。为简化模型,将后 5 个水源合并入各区域的地下水源。北京市地下水可开

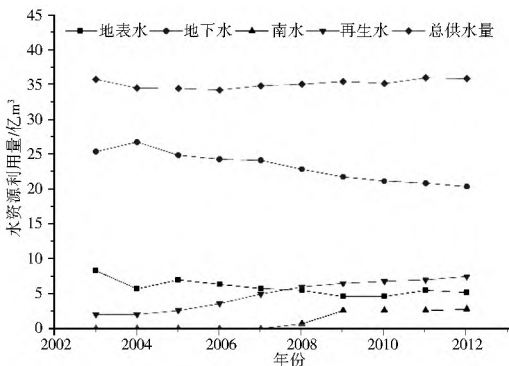


图 1 北京市 2003 年-2012 年水资源利用变化
Fig.1 Water supply in Beijing during 2003 to 2012

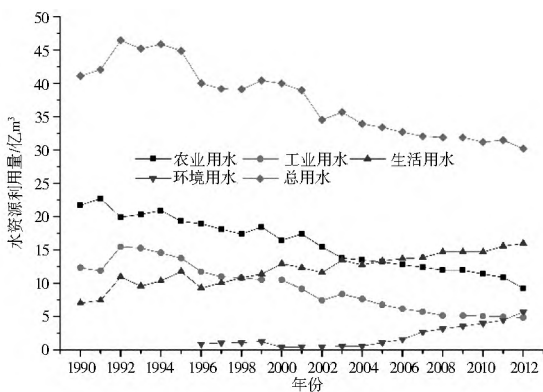


图 2 北京市 1990 年-2012 年用水量变化

Fig.2 Water consumption in Beijing during 1990 to 2012

北京市共包括 16 个行政区县,其中中心城区 6 个,郊区县 10 个。考虑到中心城区供水管网接近 100% 的覆盖率,将 6 个城区概化成一个市区受水点,即用水区域有 11 个,包括城六区及 10 个郊区县。每个区域用水户又细分为工业生活、农业生活和生态环境用户三类,其中城六区不考虑农业生活用水户,合计 32 类用水户。何慧凝^[16]在 2010 年用

采量为 24 亿 m^3 ^[20], 考虑到地下水水质问题等限制因素后, 确立 2020 年地下水可供水量为 20.6 亿 m^3 。

再生水可用于水质要求不高的城市环境用水、工业低质用水、道路浇洒等市政用水及农业灌溉等用途。计算采用北京市“十二五”城市供水规划结果, 城六区再生水生产能力 433.9 万 m^3/d 。

南水北调中线工程从长江最大支流汉江的丹江口水库引水, 经长江流域、淮河流域、唐白河流域、黄淮海平原, 挖渠自流到北京颐和园团城湖^[21]。根据水利部长江委员会 2002 年完成的南水北调中线成果, 2010 年中线一期多年平均北调水 95 亿 m^3 , 考虑损失后, 净供水量为 85 亿 m^3 , 其中北京多年平均配水量为 12.38 亿 m^3 。本文计算采用 1981 年-1995 年南水北调中线模拟入流序列作为输入, 各年进京总水量见表 3。

表 3 1981 年-1995 年来水

Tab. 3 Synthetic water diversion of SNWD project during 1981 to 1995

		亿 m^3							
年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
进京水量	14.78	13.56	14.94	16.61	14.39	13.14	13.82	14.26	
潮白河入库	3.22	6.01	3.78	2.50	2.71	3.62	3.98	3.61	
年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995		
进京水量	15.56	11.47	10.33	11.50	10.94	10.92	4.98		
潮白河入库	2.44	4.09	6.29	3.79	3.06	6.46	3.71		

2.2 供水配置网络

南水北调进京后, 需对北京市现有的供水系统进行适当修改, 才能做到水资源的充分利用。南水北调中线北京段供水范围主要为永定河、潮白河、北运河平原, 通过官厅、密云两大供水系统联合调度。

为构建“引江、引黄、引冀水入京, 并与本地 10 座水库、11 处地下水水源地和 11 个再生水厂统一配置”的水源保障格局, 建立本地水源支撑、再生水补充、外调水保障、备用水源应急的多水源、互联互通、分质供水、安全可靠的水源系统。考虑到城市工业生活供水保证率要求较高, 农业生活供水与河道生态环境供水保证率要求较低, 水源供水优先级依次为工业生活供水、农业生活供水、生态环境供水, 得到 2020 年的供水配置网络(图 3)。为评价北京市供水可持续性, 采用水资源评估和规划系统(WEAP)软件对其进行模拟, 建立的 WEAP 北京市供水系统模型, 见图 4。

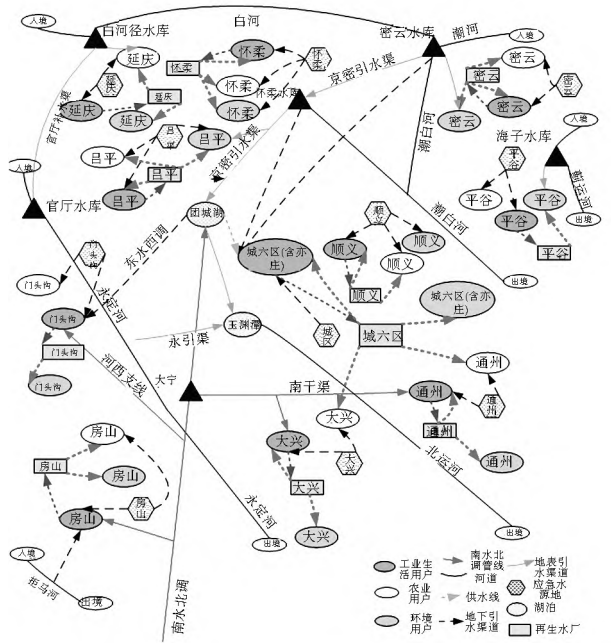


图 3 配置网络概化

Fig. 3 The schematic diagram of water resources deployment

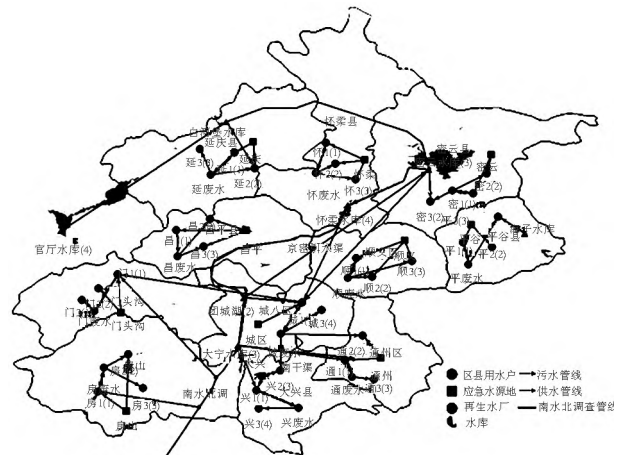


图 4 WEAP 北京供水模型

Fig. 4 Water resources deployment WEAP model of Beijing

3 供水可持续性评价

3.1 两方案可持续评价

对北京市供水可持续性进行评价, 分析在现行北京市供水配置网络下南水进京前后对供水的影响, 据此拟定了两个模拟方案: 方案 1 为无南水北调来水, 方案 2 为有南水北调来水。南水及密云水库的入流输入采用 15 年(1981 年-1995 年)的实际入流序列, 其余各区各用户的需水情况采用 2020 需水预测值。

通过模型模拟, 得到两种方案各用户的 15 年累积缺水量, 见表 4。总体而言, 由于供水优先级的设定, 工业生活用水户的供水较为稳定, 缺水较少, 而农业生活和生态环境用水户在来水较少时无法得到充分保证, 累积缺水量较大。

表 4 两种方案各类用户 15 年累积缺水量

Tab. 4 The 15-year cumulative water deficits of different water users, two baseline scenarios

序号	缺水户	年需水	亿 m ³	
			方案 1 原配置无南水	方案 2 原配置有南水
1	城区工业生活	14.60	28.19	0.00
2	城区生态环境	3.30	48.72	45.13
3	房山生态环境	0.18	2.70	2.70
4	门头沟生态环境	0.12	0.56	0.56
5	密云生态环境	0.25	2.75	0.00
6	通州农业生活	2.44	0.96	0.00
7	通州生态环境	0.20	0.10	0.00
8	大兴农业生活	2.87	3.86	0.00
9	大兴生态环境	0.11	0.23	0.01
10	延庆生态环境	0.05	0.85	0.75
总计	所有缺水户	24.12	88.92	49.15

城六区工业生活用水占全市总用水的 35.5%，是全市最大的用水户，在没有南水北调来水（方案 1，原配水无南水）情况下，这类用水户有较大的用水缺口（表 6），其工业生活及生态环境缺水量分别为 28.19 亿 m³、48.72 亿 m³，平均每年缺水量为 1.88 亿 m³ 和 3.25 亿 m³，相较于两用户年需水量，可见城区供水满足程度极低，水资源极度紧张。在该方

案下，城六区生态环境缺水所占的缺水比例最大，其次为城区工业用水、大兴农业生活用水、密云生态环境用水、房山生态环境用水，通州农业生活及生态，门头沟区及延庆区的生态环境用水也会有少量短缺。加入南水北调来水之后（方案 2，原配置有南水），缺水量有了显著的改善，密云生态、通州农业生活、大兴农业生活等用户需水要求得到满足，城区工业生活需水得到保障，但是房山区及城六区的生态环境仍面临严重缺水。

以月为计算时段，计算连续 15 年两种供水方案的持续性指标，结果见表 5（仅展示缺水用户，不缺水用户可持续指数为 1.0）。可以看出方案 2 的持续性普遍大于方案 1，城区工业生活用水因得到南水的补充，SI 指数由 0.404 变为 1.0，供水完全得到满足；密云、通州、大兴等用水户供水也得到满足。

值得注意的是，表中有很多用户的可靠性指数与弹性指数为零，但破坏的严重程度却很低，导致该用户的供水可持续指数为零，也即完全不具备可持续性，如城区生态环境用水户、房山生态环境用水户、延庆生态环境用水户等。造成这个结果的原因是此类用户水源供水量处于持续较低的状况，虽然能够得到一定量的供水，但总是比该用户的所需水量少，长期处于缺水状态，得不到恢复。

表 5 两种方案北京市供水可持续性指标

Tab. 5 Sustainability index values, two baseline scenarios

序号	用户	用户需水 / 亿 m ³	方案 1 原配置无南水					方案 2 原配置有南水				
			Rel	Res	1-Vul	1-Maxd	SI	Rel	Res	1-Vul	1-Maxd	SI
1	城区工业生活	14.60	0.561	0.051	0.976	0.958	0.404	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	城区生态环境	3.30	0.000	0.000	0.918	0.915	0.000	0.000	0.000	0.924	0.915	0.000
3	房山生态环境	0.18	0.000	0.000	0.917	0.915	0.000	0.000	0.000	0.917	0.915	0.000
4	门头沟生态环境	0.12	0.000	0.000	0.974	0.973	0.000	0.000	0.000	0.974	0.973	0.000
5	密云生态环境	0.25	0.117	0.000	0.931	0.924	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	通州农业生活	2.44	0.967	0.000	0.934	0.880	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	通州生态环境	0.20	0.967	0.000	0.916	0.915	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8	大兴农业生活	2.87	0.883	0.143	0.936	0.886	0.569	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9	大兴生态环境	0.11	0.861	0.040	0.918	0.915	0.412	0.989	1.000	0.946	0.943	0.969
10	延庆生态环境	0.05	0.000	0.000	0.917	0.915	0.000	0.000	0.000	0.917	0.915	0.000

3.2 新增方案可持续评价

根据上一节的分析，当前供水配置虽然可以保证绝大多数用水户的需水，但仍有个别用户大量缺水，特别是城六区的生态环境，南水进京并没有得到很好的利用，可见供水配置网络存在一定局限。因此，本文在满足水源配置的基本原则情况下，对缺水用户的水源利用做出一定调整：新增官厅水库供水，

为门头沟市农业及生态用水户提供水源；增加地下水水源为保障房山区、城六区生态用水；增加白河堡地表水水源为延庆生态用水户供水，更新供水配置网络。各新增水源可供水量见表 2。

为了评价新的供水配置网络的可持续性，新增两种供水模拟方案：方案 1' 为新配置无南水方案，方案 2' 为新配置有南水方案。采用 2020 年需水预

测,重新计算北京市的供水情况,得到四种不同方案 各类用户 15 年累积缺水量,见表 6。

表 6 四种方案各类用户 15 年累积缺水量

Tab. 6 The 15-year cumulative water deficits of different water users, all four scenarios

序号	缺水户	年需水量	方案 1		方案 2	
			无南水		有南水	
			原配置	新配置	原配置	新配置
1	城区工业生活	14.60	28.19	38.60	0.00	0.00
2	城区生态环境	3.30	48.72	31.85	45.13	0.00
3	房山生态环境	0.18	2.70	0.00	2.70	0.00
4	门头沟生态环境	0.12	0.56	0.00	0.56	0.00
5	密云生态环境	0.25	2.75	2.75	0.00	0.00
6	通州农业生活	2.44	0.96	4.16	0.00	0.00
7	通州生态环境	0.20	0.10	0.42	0.00	0.00
8	大兴农业生活	2.87	3.86	4.86	0.00	0.00
9	大兴生态环境	0.11	0.23	0.28	0.01	0.01
10	延庆生态环境	0.05	0.85	0.74	0.75	0.73
总计	所有缺水户	24.12	88.92	83.66	49.15	0.74

方案 1 和 1' (新配置无南水方案), 15 年累积缺水量最大, 分别为 88.92 亿 m³、83.66 亿 m³, 而方案 2' (新配置有南水方案) 缺水量最少, 仅为 0.74 亿 m³。在新配置下, 即使无南水供水, 城六区生态缺水也存在显著降低, 但城六区工业生活和通州农业生活用水户缺水却增加了, 这主要是由于城区地下水水源可供给量有限, 在满足了城区生态用水

后, 工业生活可供给量相应减少; 南水补充之后, 新的配置方案仅有延庆生态用水户会有少量缺水, 其他用户需水量都得到了满足, 大大提高了北京市的供水满足程度。

以各用户的需水量占各区总需水的比值为权重, 得到四种方案连续 15 年北京市各区供水系统的持续性指数 SG, 见表 7 和图 5。

表 7 四种方案北京市供水可持续性 SI 指标

Tab. 7 Sustainability index values, all four scenarios

序号	缺水户	年需水量 / 亿 m ³	方案 1		方案 2	
			无南水		有南水	
			原配置	新配置	原配置	新配置
1	城区工业生活	1460	0.404	0.363	1.000	1.000
2	城区生态环境	330	0.000	0.260	0.000	1.000
3	房山生态环境	18	0.000	1.000	0.000	1.000
4	门头沟生态环境	12	0.000	1.000	0.000	1.000
5	密云生态环境	25	0.000	0.000	1.000	1.000
6	通州农业生活	244	0.000	0.370	1.000	1.000
7	通州生态环境	20	0.000	0.374	1.000	1.000
8	大兴农业生活	287	0.569	0.486	1.000	1.000
9	大兴生态环境	11	0.412	0.354	0.969	0.975
10	延庆生态环境	5	0.000	0.000	0.000	0.121

在没有南水的情况下, 新配置方案对供水的改善效果并不太明显, 仍处于较低水平, 甚至个别用户的可持续性指数反而降低, 如城区工业生活用水户、大兴农业生活及生态用水户, 但是新配置方案有效

地避免了个别用水户的持续缺水状态, 可以满足北京市供水可持续发展。

四种不同供水方案对应的全市 SG 指数见图 5(a) 至图 5(d) 依次为 0.598、0.629、0.911、

0.999, 对应最小区域 SG 指数依次为城六区、门头沟区及延庆区。方案 1 仅有四个区群持续性指数达到 1.0, 也即从未出现过缺水, 分别为怀柔区、昌平区、顺义区及平谷区, 方案 1' 有 6 个区群持续性指数

达到 1.0; 方案 2 依然五个区方案存在缺水, 而方案 2' 仅有三个区出现过缺水。对比可知, 南水北调来水可以显著改善北京市缺水情况, 修改后的配置方案具有最高的供水可持续性。

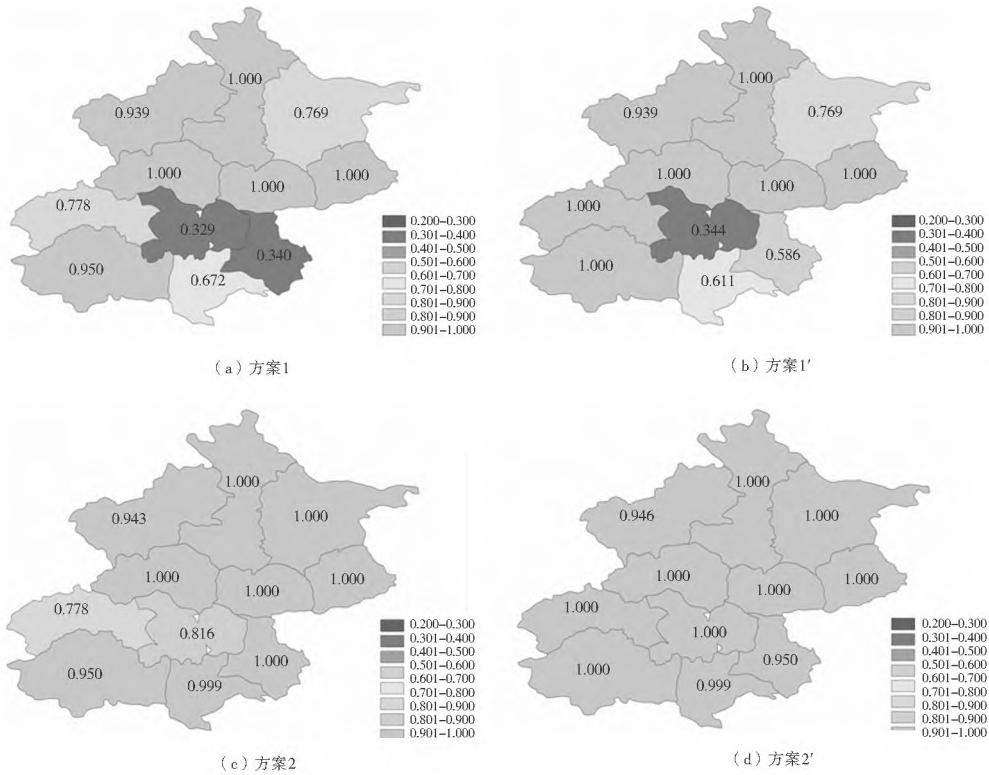


图 5 四种供水配置方案各区域群持续性指数

Fig. 5 Sustainability by region, all four scenarios

4 结论

通过对北京市水资源现状调查, 得到北京市现状及未来的供需水条件, 在南水北调中线正式通水的大背景下, 结合可持续发展理念, 构建了北京市 2020 年供水配置系统模型并对供水配置网络做出了可持续性评价, 得到以下结论: (1) 总体而言, 工业生活用水的供水保证率高于农业及生态; (2) 南水北调中线工程的开通可以显著改善北京市缺水情况; (3) 修改后的供水配置方案更利于各类水源的综合利用, 保证供水可持续性。

参考文献(References):

[1] 廖强, 张士锋, 陈俊旭. 北京市水资源短缺风险等级评价与预测 [J]. 资源科学, 2013(1): 140-147. (LIAO Qiang, ZHANG Shifeng, CHEN Junxu. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing [J]. Resources Science, 2013(1): 140-147. (in Chinese))

[2] 赵举兴, 张中旺, 许应石. 湖北汉江流域水资源短缺风险评价 [J]. 湖北文理学院学报, 2013(11): 43-47. (ZHAO Juxing, ZHANG Zhongwang, XU Yingshi. Risk assessment of water

shortage of Han River drainage in Hubei Province [J]. Journal of Hubei University of Arts and Science, 2013(11): 43-47. (in Chinese))

[3] Loucks D P. Quantifying trends in system sustainability [J]. Hydrological Sciences Journal, 1997, 42(4): 513-530.

[4] 李九一, 李丽娟, 柳玉梅, 等. 区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系——以京津唐地区为例 [J]. 地理科学进展, 2010(9): 1041-1048. (LI Jiuyi, LI Lijuan, LIU Yumei, et al. Framework of water scarcity assessment and solution at regional scales: a case study in Beijing-Tianjing-Tangshan region [J]. Progress in Geography, 2010(9): 1041-1048. (in Chinese))

[5] Organization W H. Summary and policy implications Vision 2030: the resilience of water supply and sanitation in the face of climate change [J]. 2009.

[6] Mendoza V M, Villanueva E E, Adem J. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change [J]. Climate Research, 1997, 9(1-2): 139-145.

[7] 王颖, 马莉媛, 郁尧, 等. 关于水资源风险评价数学模型的讨论 [J]. 南水北调与水利科技, 2010(2): 69-72. (WANG Ying, MA Liyuan, YU Yao, et al. Discussion on risk evaluation modeling of water resources [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2010(2): 69-72. (in Chinese))

[8] 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, 2010, 137(5): 381-390.
- [9] 刘平平, 粟晓玲. 冯家山水库供水持续性评价[J]. 排灌机械工程学报, 2013(07): 580-585. (LIU Ping ping, SU Xiaoling. Evaluating water supply sustainability of Fengjiashan Reservoir [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013(07): 580-585. (in Chinese))
- [10] 张士锋, 孟秀敬, 廖强. 北京市水资源与水量平衡研究[J]. 地理研究, 2012(11): 1991-1997. (ZHANG Shifang, MENG Xiujing, LIAO Qiang. Research on water resources and water balance in Beijing [J]. Geographical Research, 2012(11): 1991-1997. (in Chinese))
- [11] 王明明, 谢永生, 王恒俊, 等. 水库集水区水土保持与流域产水量——以密云水库上游潮白河流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2007(5): 79-82. (WANG Mingming, XIE Yongsheng, WANG Hengjun, et al. Soil and water conservation of reservoir watershed and its water yield: a case study of Chaobaihe River basin on the upper reaches of Miyun Reservoir [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007(5): 79-82. (in Chinese))
- [12] 高迎春, 姚治君, 刘宝勤, 等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J]. 地理科学进展, 2002(06): 546-553. (GAO Yingchun, YAO Zhijun, LIU Baqin, et al. Evolution trend of Miyun Reservoir inflow and its motivating factors analysis [J]. Progress in Geography, 2002(06): 546-553. (in Chinese))
- [13] 夏军, 李璐, 严茂超, 等. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008(6): 319-323. (XIA Jun, LI Lu, YAN Maoshao, et al. Impacts of climate changes on water resource of Miyun Reservoir and adaptation managements [J]. Advances in Climate Change Research, 2008(6): 319-323. (in Chinese))
- [14] 田雨, 雷晓辉, 孙甲岚, 等. 南水北调通水前北京市水资源情势及应对措施[J]. 南水北调与水利科技, 2011(2): 60-63. (TIAN Yu, LEI Xiaohui, SUN Jialan, et al. Current situation and corresponding solutions of water resource carrying capacity in Beijing before the completion of South to North Water Diversion project [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011(2): 60-63. (in Chinese))
- [15] 北京市水务局. 北京水资源公报[R]. 2013. (MWR-PRC. Beijing Water Resources Bulletin. Ministry of Water Resources of PRC, Beijing Water Authority [R]. 2013. (in Chinese))
- [16] 何慧凝. 北京市需用水规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (HE Huining. Study on the water use and water demand of Beijing City [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [17] 邢贵海. 怀柔水库流域径流分析与未来水资源管理[J]. 中国防汛抗旱, 2011(S1): 40-42. (XING Guihai. Runoff in Huairou reservoir basin and future water management [J]. China Flood and Drought Management, 2011(S1): 40-42. (in Chinese))
- [18] 唐颖, 麻军, 郭金燕. 白河堡水库为延庆平原区集中供水的可行性分析[J]. 北京水务, 2008(5): 31-33. (TANG Ying, MA Jun, GUO Jinyan. Feasibility of Yanqing plain area concentrated water supply from Baihebao reservoir [J]. Beijing Water, 2008(5): 31-33. (in Chinese))
- [19] 陈月平. 人类活动对官厅水库入库径流的影响[J]. 北京水利, 2003(2): 35-36. (CHEN Yueping. Human activities on runoff of the Guanting reservoir [J]. Beijing Water Resources, 2003(2): 35-36. (in Chinese))
- [20] 汪珊, 张彤, 黄大英, 等. 北京市地下水合理开发与保护: 首届全国地下水开发利用与污染防治技术交流研讨会[C]. 南京, 2009. (WANG Shan, ZHANG Tong, HUANG Daying, et al. The rational utilization and protection of groundwater in Beijing: First National Exploitation and Utilization of Groundwater and Pollution Prevention Technology Interchange Conference [C]. Nanjing, 2009. (in Chinese))
- [21] 中国南水北调[EB/OL]. [2015/4/16]. <http://www.nsb.gov.cn/>. (South to North Water Diversion [EB/OL]. [2015/4/16]. <http://www.nsb.gov.cn/>. (in Chinese))

(上接第 54 页)

- [23] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1018-1024. (CHEN Shutao, LIU Qiaohui, HU Zhenghua, et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1018-1024. (in Chinese))
- [24] Lloyd J, Taylor J. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [25] Larionova A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, et al. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27: 251-257.
- [26] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 1972-1980. (ZHAO Hailin, LI Yuqiang, ZHOU Ruilian. Soil respiration rates and its relation with environmental factors in Horqin Sand Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 1972-1980. (in Chinese))