

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0005

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):34-41,137. LIU H Q,ZHAO Y,LI H H,et al. Optimal water resources allocation based on interval two-stage stochastic programming in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):34-41,137. (in Chinese)

# 基于区间两阶段随机规划方法的 北京市水资源优化配置

刘寒青<sup>1</sup>,赵勇<sup>1</sup>,李海红<sup>1</sup>,王丽珍<sup>1</sup>,常奂宇<sup>1</sup>,彭鹏<sup>2</sup>

(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. 河北省水文水资源勘测局,石家庄 050031)

**摘要:**针对缺水型城市水资源配置过程中的不确定性,建立了基于不确定性基本理论的区间两阶段随机规划模型,应用于北京市2025年水资源优化配置的研究。以北京市用水综合效益最大为目标函数,引入概率分布和区间数表示多重不确定性,求得北京市2025年城六区与郊区在生活、工业、农业与生态用水上的优化供水目标以及不同来水水平下的配水方案。结果表明:北京市2025年优化供水目标为47.39亿m<sup>3</sup>,城六区工业用水与郊区农业用水的供水目标应采取保守值;不同来水水平下的优化配置水量为[36.49,47.39]亿m<sup>3</sup>,仅北京为丰水年时不存在缺水现象,北京与丹江口水库同时遇枯时的缺水量高达[5.48,10.90]亿m<sup>3</sup>,对北京市供水安全造成极大的威胁。该模型充分考虑不确定因素对水资源配置的影响,权衡用水收益与缺水风险的关系,并以区间的形式给出配置结果,可为北京市2025年供水目标与水资源优化配置方案的制定以及水资源安全保障措施的分析提供科学依据。

**关键词:**北京;水资源优化配置;区间;两阶段随机规划;不确定性

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Optimal water resources allocation based on interval two-stage stochastic programming in Beijing

LIU Hanqing<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, LI Haihong<sup>1</sup>, WANG Lizhen<sup>1</sup>, CHANG Huanyu<sup>1</sup>, PENG Peng<sup>2</sup>

(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. Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** Considering the uncertainty in the water resources allocation process of water-deficient cities, an interval two-stage stochastic programming model was established for the study of optimal water resource allocation in Beijing for 2025. This model took the maximum comprehensive benefit of water use in Beijing as the objective function, introduced probability distribution and interval number to represent multiple uncertainties, and obtained the optimal water supply objectives and water distribution schemes under different levels of water inflow for living, industrial, agricultural and ecological water use in six urban areas and suburbs of Beijing for 2025. The results showed that the optimal water supply target of Beijing in 2025 was 4.739 billion m<sup>3</sup>, and the water supply target of industrial water in six urban areas and agricultural water in suburbs should be conservative. The optimal allocation of water under different levels of inflow was [3.649, and 4.739] billion m<sup>3</sup>, respectively, and there was no water shortage when there was a high flow year in Beijing. Likewise in the same periods, the water shortage was [0.548, and

收稿日期:2019-04-12 修回日期:2019-06-22 网络出版时间:2019-06-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190625.0842.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401306);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B622017)

作者简介:刘寒青(1996—),女,湖南岳阳人,主要从事水文与水资源研究。E-mail:hamtsing@126.com

通信作者:赵勇(1977—),男,安徽宿州人,教授级高级工程师,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:zhaoyong@iwahr.com

1.090] billion m<sup>3</sup>, respectively, when there was a low flow year in Beijing and Danjiangkou reservoir. This scenario posed a great threat to the water supply security of Beijing. This model fully considered the impact of uncertain factors on water resources allocation, evaluated the relationship between water use benefits and water shortage risks, and obtained the allocation results in the form of interval. This study can provide a scientific basis for the formulation of water supply objectives and optimal allocation of water resources as well as the analysis of water resource security measures in Beijing for 2025.

**Key words:** Beijing; optimal water resources allocation; interval; two-stage stochastic programming; uncertainty

北京市区域面积16 412 km<sup>2</sup>,下辖16个行政区县,人口超过2 000万,人均水资源占有量不足200 m<sup>3</sup>,远低于世界公认的极度缺水地区标准,属于水资源严重短缺的特大城市。1999年以来,北京市连续遭遇干旱,地表水量锐减,地下水位连续大幅度下降,水资源供需矛盾日益突出,多次出现严重的水危机,给北京市供水安全保障带来了极大的威胁,为此,20年以来北京市不得不采取跨区域调水、超采地下水、启用应急水源地等非常规措施来支撑全市的用水需求和社会经济的高速发展,水资源短缺已然成为制约北京市经济社会可持续发展的突出瓶颈<sup>[1]</sup>。因此,在国家实施最严格水资源管理的框架下,对北京市有限的水资源进行优化配置,是缓解北京市水危机的现实需要,对北京市水资源安全保障以及社会经济可持续发展有着重要的意义。

由于水资源系统与水资源优化配置中存在着不确定性和复杂性,例如规划期来水水平、水源供水能力、需水量等难以提前进行精准的预测,因此,近些年来许多不确定性水资源优化配置方法被应用于区域水资源优化配置中,有效地解决了水资源优化配置中的不确定性问题<sup>[2-9]</sup>。但在以往的北京市水资源优化配置研究中多采用确定性模型,很少考虑系统的不确定性,这可能会导致模型结果与最终实际情况相差较大,使得模型的应用价值较低<sup>[1,10-14]</sup>。

在区域水资源优化配置系统中,水量分配得越多,获得的收益也就越大,但在来水水平较低时,面临的缺水风险及其造成的损失就会较大,当降低供水目标时,预期的收益会随之减少,但同时也降低了缺水风险及其可能造成的经济损失。因此,如何平衡用水效益与缺水风险是区域水资源优化配置需要注意的问题,通常两阶段随机规划是解决不确定条件下此类问题的有效方法<sup>[2,5-8,15]</sup>。综合考虑水资源系统与区域水资源优化配置中的不确定性和复杂性,本文将采用区间两阶段随机规划模型进行不确定条件下北京市水资源优化配置研究,并使用Lingo软件进行模型求解,以期北京市水资源优化配置方案的制定提供决策支持。

## 1 区间两阶段随机规划(ITSP)模型

### 1.1 模型建立

两阶段随机规划模型可有效平衡不确定条件下的水资源优化配置问题,模型第一阶段的决策在随机事件发生前做出,当随机事件发生之后,再做出第二阶段的决策来减少系统损失。在进行区域水资源优化配置时,决策者通常先对区域综合需水量以及水源的供水能力进行预测,预先判断未来规划期内的供水量,从而提前规划生活、生产的规模。这种预先决策由于水资源系统的不确定性而存在风险,如果实际供水不能达到规划的供水目标,就要临时增加调水或缩减生产规模等,会导致一定的经济损失,当不确定性事件发生之后,再进行第二阶段的修正来弥补第一阶段决策的不合理所带来的损失,从而实现区域用水效益最大化<sup>[5]</sup>。

本研究以北京市2025年水资源优化配置为例,引入用水综合效益、用水效益系数、用水费用系数和缺水惩罚系数,以充分供水条件下的北京市用水综合效益为第一阶段(区域供水目标中的供水量为第一阶段决策变量),以供水量达不到目标时引起的经济损失为第二阶段(供水达不到目标时的缺水量为第二阶段决策变量),建立以北京市用水综合效益最大为目标的模型,见式(1)。

$$\max f = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (a_{ij} - b_{ij}) X_{ij} - E \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 C_{ij} Q_{ij} \right] \quad (1)$$

约束条件

水源供水能力约束

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (X_{ij} - Q_{ij}) \leq \eta S \quad (2)$$

最小需水量约束

$$X_{ij} - Q_{ij} \geq W_{ij, \min} \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$W_{ij, \min} = \alpha_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

变量非负约束

$$Q_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (5)$$

式中: $f$ 是用水综合效益(目标函数)(亿元); $i$ 是不同区域, $i=1$ 代表城六区, $i=2$ 代表郊区; $j$ 是不同用水户, $j=1$ 代表生活用水, $j=2$ 代表工业用水,

$j=3$ 代表农业用水, $j=4$ 代表生态用水; $a_{ij}$ 是*i*区域*j*用户的用水效益系数(元/ $m^3$ ); $b_{ij}$ 是*i*区域*j*用户的用水费用系数(元/ $m^3$ ); $X_{ij}$ 是预先决策中*i*区域*j*用户的供水目标(第一阶段决策变量)(亿  $m^3$ ); $C_{ij}$ 是*i*区域*j*用户的供水目标未达到时的缺水惩罚系数(元/ $m^3$ ); $Q_{ij}$ 是*i*区域*j*用户未达到预先决策的缺水量(第二阶段决策变量)(亿  $m^3$ ); $E[\cdot]$ 表示随机变量的期望值; $\eta$ 是供水利用系数( $\eta=1$ 为城市供水管网漏损率),参考国内外城市供水管网漏损率的先进值 5%,北京市 2025 年供水利用系数取 0.95<sup>[16-17]</sup>;S 是可供水总量(亿  $m^3$ ); $W_{ij,\min}$ 是*i*区域*j*用户的最小需水量; $\alpha_{ij}$ 是*i*区域*j*用户的供水保证率。

第二阶段决策变量  $Q_{ij}$  是随机变量,概率分布难以确定,因此将不同来水水平情况下的缺水量按照离散变量处理。北京市本地可供水量受北京来水水平的影响,而外调水可供水量受丹江口水库来水水平的影响,本研究将两地不同典型年组合情况下的缺水量作为离散点,每种情况对应出现的概率为  $p_m p_n$

$$\sum_{m=1}^4 p_m = 1, \sum_{n=1}^4 p_n = 1 \quad (6)$$

$$E\left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 C_{ij} Q_{ij}\right] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 C_{ij} \left(\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 p_m p_n Q_{ijmn}\right) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 p_m p_n C_{ij} Q_{ijmn} \quad (7)$$

式中: $p_m$ 是北京出现典型年*m*的概率, $m=1$ 代表丰水年, $m=2$ 代表平水年, $m=3$ 代表枯水年, $m=4$ 代表特枯年; $p_n$ 是丹江口水库出现典型年*n*的概率, $n=1$ 代表丰水年, $n=2$ 代表平水年, $n=3$ 代表枯水年, $n=4$ 代表特枯年; $Q_{ijmn}$ 是*i*区域*j*用户在典型年*mn*时未达到供水目标的缺水量(亿  $m^3$ )。

由于水资源系统的复杂性和不确定性,决策者很难对可供水量做出预测,故第一阶段的供水目标是不确定的;用水效益系数、用水费用系数和缺水惩罚系数等也是不确定的。为了表示这种不确定性,本研究引入区间参数,“+”表示参数的上限值,“-”表示参数的下限值,建立 ITSP 模型为

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (a_{ij}^{\pm} - b_{ij}^{\pm}) X_{ij}^{\pm} - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 p_m p_n C_{ij}^{\pm} Q_{ijmn}^{\pm} \quad (8)$$

约束条件:

水源供水能力约束

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (X_{ij}^{\pm} - Q_{ijmn}^{\pm}) \leq \eta S_{mn}^{\pm} \quad \forall m, n \quad (9)$$

最小需水量约束

$$Q_{ijmn}^{\pm} \leq (1 - \alpha_{ijm}) X_{ij}^{\pm} \quad \forall i, j, m, n \quad (10)$$

变量非负约束

$$Q_{ijmn}^{\pm} \geq 0 \quad \forall i, j, m, n \quad (11)$$

式中: $\alpha_{ijm}$ 是北京本地出现典型年*m*时*i*区域*j*用户的供水保证率。

## 1.2 模型求解

在上述模型中, $X_{ij}^{\pm}$ 是区间形式的,不能直接使用线性规划的方法对其求解。因此参考文献[5]提供的求解方法,引入决策变量  $z_{ij}$ ,  $z_{ij} \in [0, 1]$ ,令  $X_{ij}^{\pm} = X_{ij}^{-} + \Delta X_{ij} z_{ij}$ ,其中  $\Delta X_{ij} = X_{ij}^{+} - X_{ij}^{-}$ , $z_{ij}$ 是确定值,此时  $X_{ij}^{\pm} = X_{ij}^{-} + \Delta X_{ij} z_{ij}$ 变为确定值,因此可用线性规划的方法求解。通过模型求解可以得到决策变量  $z_{ij}$  的最优值  $z_{ij,opt}$ ,从而得到  $X_{ij}^{\pm}$  的最优值  $X_{ij,opt}^{\pm} = X_{ij}^{-} + \Delta X_{ij} z_{ij,opt}$ ,即确定了用水综合效益最大时的供水量,并以此作为已知量进一步求解模型,最终确定水资源优化配置方案。

根据区间交互算法,可将上述模型转化为两个确定的子模型。由于目标函数是用水综合效益最大,因此需要先进行符合  $f^+$  的模型计算以扩大决策空间<sup>[2]</sup>。求解目标上限值的子模型为

$$\max f^+ = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (a_{ij}^+ - b_{ij}^-) (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij}) - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 p_m p_n C_{ij}^- Q_{ijmn}^- \quad (12)$$

约束条件:

水源供水能力约束

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij} - Q_{ijmn}^-) \leq \eta S_{mn}^+ \quad \forall m, n \quad (13)$$

最小需水量约束

$$Q_{ijmn}^- \leq (1 - \alpha_{ijm}) (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij}) \quad \forall i, j, m, n \quad (14)$$

变量非负约束

$$Q_{ijmn}^- \geq 0 \quad \forall i, j, m, n \quad (15)$$

其中, $Q_{ijmn}^-$ 和  $z_{ij}$  是上限子模型的决策变量,求解可得  $f^{+opt}$ ,  $Q_{ijmn,opt}^-$  和  $z_{ij,opt}$ ,则优化供水目标为  $X_{ij,opt}^{\pm} = X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij,opt}$ 。同理,符合目标函数下限的子模型为

$$\max f^- = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (a_{ij}^- - b_{ij}^+) (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij,opt}) - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 p_m p_n C_{ij}^+ Q_{ijmn}^+ \quad (16)$$

约束条件:

水源供水能力约束

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij,opt} - Q_{ijmn}^+) \leq \eta S_{mn}^- \quad \forall m, n \quad (17)$$

最小需水量约束

$$Q_{ijmn}^+ \leq (1 - \alpha_{ijm}) (X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij,opt}) \quad \forall i, j, m, n \quad (18)$$

变量非负约束

$$Q_{ijmn}^+ \geq 0 \quad \forall i, j, m, n \quad (19)$$

其中,  $Q_{ijmn}^+$  是下限子模型的决策变量, 经过求解计算可得  $f_{opt}^+$ ,  $Q_{ijmn,opt}^+$ 。将两个子模型求解结果合并, 得到 ITSP 模型的优化解为

$$f_{opt}^{\pm} = [f_{opt}^-, f_{opt}^+] \quad (20)$$

$$Q_{ijmn,opt}^{\pm} = [Q_{ijmn,opt}^-, Q_{ijmn,opt}^+] \quad (21)$$

$$X_{ij,opt}^{\pm} = X_{ij}^- + \Delta X_{ij} \approx_{ij,opt} \quad (22)$$

### 1.3 模型参数

北京市可供水总量受北京本地和丹江口水库来水水平共同影响, 考虑不同来水水平下可供水总量

的不确定性, 可将其看作区间随机变量, 并考虑北京本地和丹江口水库两地遭遇丰水年、平水年、枯水年和特枯年的组合情况, 进一步将可供水总量离散为具有相应概率的区间随机变量。根据《北京市“十三五”时期水资源保护利用规划》中的可供水分析与北京市近年来实际供用水情况, 估算得出不同来水水平下北京市 2025 年可供水总量的预测结果(表 1), 其中北京本地和丹江口水库遭遇丰水年、平水年、枯水年和特枯年的概率均依次为 0.2、0.5、0.25、0.05。

表 1 不同来水水平下北京市 2025 年可供水总量

Tab.1 Total amount of water supply of Beijing in 2025 under different inflow conditions

单位: 亿 m<sup>3</sup>

丹江口水库 来水水平	北京本地来水水平			
	丰 $p=20\%$	平 $p=50\%$	枯 $p=75\%$	特枯 $p=95\%$
丰 $p=20\%$	[53.33, 56.28]	[47.27, 49.88]	[43.42, 45.83]	[41.79, 43.79]
平 $p=50\%$	[52.84, 55.76]	[46.81, 49.40]	[42.79, 45.16]	[41.00, 43.27]
枯 $p=75\%$	[51.84, 54.71]	[45.67, 48.20]	[41.79, 44.11]	[40.00, 42.22]
特枯 $p=95\%$	[49.95, 52.71]	[43.08, 45.47]	[40.80, 43.05]	[38.41, 40.53]

在进行区域水资源配置时, 为了对未来规划期内的供水量进行预先判断, 还需对区域综合需水量进行预测。根据《北京市“十三五”时期水资源保护利用规划》《北京城市总体规划(2016—2035)》等成果, 预测北京市 2025 年城六区与郊区各用水户的用水需求, 表 2 以区间形式展示了北京市 2025 年城六区与郊区各用水户的供水目标, 并以此作为模型第

一阶段决策变量的取值范围。考虑不同区域不同用水户供水存在优先次序, 且当北京本地来水水平不同时, 生态用水和农业用水的供水保证率也会有所不同, 因此分析得到不同来水水平下北京市各区域各用水户的供水保证率见表 3, 从而可进一步求出不同典型年下北京市各区域各用水户的最小需水量, 以此作为模型最小需水量约束。

表 2 北京市 2025 年城六区与郊区各用水户供水目标

Tab.2 Water supply targets for water users in six districts and suburbs of Beijing for 2025

单位: 亿 m<sup>3</sup>

区域 $i$	用水户 $j$				合计
	生活用水	工业用水	农业用水	生态用水	
城六区	[10.36, 12.37]	[0.72, 1.04]	[0.05, 0.08]	[8.42, 9.88]	[19.55, 23.37]
郊区	[9.14, 10.50]	[1.81, 2.46]	[3.66, 4.87]	[6.33, 7.52]	[20.94, 25.35]
合计	[19.50, 22.87]	[2.53, 3.50]	[3.71, 4.95]	[14.75, 17.40]	[40.49, 48.72]

表 3 不同来水水平下北京市城六区与郊区各用水户供水保证率

Tab.3 Water supply guarantee rate of different water users in six district and suburbs of Beijing under different water inflow conditions

单位: %

用水户 $j$	区域 $i$	北京本地来水水平			
		丰 $p=20\%$	平 $p=50\%$	枯 $p=75\%$	特枯 $p=95\%$
生活用水	城六区	98	98	98	98
	郊区	95	95	95	95
工业用水	城六区	90	90	90	90
	郊区	92	92	92	92
农业用水	城六区	65	60	55	45
	郊区	70	65	60	50
生态用水	城六区	75	70	65	55
	郊区	70	65	60	50

此外,本研究采用效益分摊系数法及参考相关统计数据与文献数据来确定用水效益系数<sup>[18-24]</sup>;采用全成本水价核算方法及参考北京市水价信息来确定用水费用系数的取值<sup>[22,25-28]</sup>;通过分析供水达不到目标时的紧急调水费用或经济缩减损失以及

缺水对社会效益的负面影响来确定缺水惩罚系数<sup>[5,22]</sup>。考虑以上系数的不确定性,采用区间数来表示以上系数的取值范围,则北京市 2025 年各区域各用户的用水效益系数和费用系数以及缺水惩罚系数见表 4。

表 4 北京市 2025 年用水效益系数和费用系数与缺水惩罚系数

Tab. 4 Table Water efficiency coefficient, cost coefficient and water shortage penalty coefficient of Beijing for 2025

系数类型	区域 <i>i</i>	用水户 <i>j</i>			
		生活用水	工业用水	农业用水	生态用水
效益系数 $a_{ij}$	城六区	[40.99, 43.26]	[25.38, 26.79]	[21.89, 23.10]	[36.30, 38.30]
	郊区	[26.48, 27.94]	[29.97, 31.63]	[13.92, 14.69]	[24.70, 26.07]
费用系数 $b_{ij}$	城六区	[5.69, 6.96]	[7.11, 8.69]	[0.55, 0.67]	[3.15, 3.85]
	郊区	[5.64, 6.89]	[6.66, 8.14]	[0.50, 0.61]	[2.70, 3.30]
惩罚系数 $C_{ij}$	城六区	[44.59, 49.24]	[24.53, 27.69]	[28.48, 33.27]	[42.76, 47.86]
	郊区	[32.03, 36.66]	[35.66, 40.46]	[17.89, 22.02]	[31.68, 36.57]

## 2 结果与分析

### 2.1 优化供水目标

各区域各用水户的最优供水目标可以由  $X_{ij, opt}^{\pm} = X_{ij}^{-} + \Delta X_{ij} z_{ij, opt}$  得到,表 5 是北京市 2025 年城六区与郊区各用水户优化供水目标的计算结果。模型结果表明,在预先决策中,北京市 2025 年优化供水目标为 47.39 亿  $m^3$ ,其中城六区生活用水、农业用水、生态用水的供水目标以及郊区生活用水、工业用水、生态用水的供水目标均应取上限值( $z_{ij, opt} = 1$ ,即取供水目标上限  $X_{ij}^{+}$ ),而管理者对城六区工业用水( $z_{ij, opt} = 0.609$ )和郊区农业用水( $z_{ij, opt} = 0$ )的供水目标的制定应采取保守态度,综合考虑区域发展过程中的用水综合效益,提前计划好生产规模,以确保区域水资源配置最优化。

表 5 北京市 2025 年城六区与郊区各用水户的优化供水目标

Tab. 5 Optimization of water supply targets for water users in six districts and suburbs of Beijing for 2025

项目	区域 <i>i</i>	用水户 <i>j</i>			
		生活用水	工业用水	农业用水	生态用水
决策变量 $z_{ij, opt}$	城六区	1	0.609	1	1
	郊区	1	1	0	1
优化供水目标 $X_{ij, opt} / 亿 m^3$	城六区	12.37	0.92	0.08	9.88
	郊区	10.50	2.46	3.66	7.52

### 2.2 水资源优化配置结果分析

由 2.1 节可知 ITSP 模型中北京市 2025 年城六区与郊区各用水户的供水目标,同时根据子模型的计算结果可得到不同来水水平下不能达到供水目标的缺水量,进而求得不同来水水平下北京市水资

源优化配置结果(表 6),北京市 2025 年不同来水水平下的水资源配置总量为[36.49, 47.39]亿  $m^3$ ,且求得最大用水效益区间为[1 096.84, 1 304.09]亿元。

由表 6 可知,城六区生活用水的配置结果与北京和丹江口水库的来水水平无关,在不同来水水平下都应该按照预先决策中的供水目标充分供水,而其他用水的配置结果与北京和丹江口水库来水水平有关,且较大程度上受北京来水水平的影响。当北京为丰水年时,其他用水的配置结果与丹江口水库的来水水平无关,均可按照供水目标充分供水;当北京为平水年时,优先考虑降低城六区工业、农业用水以及郊区农业、生态用水的配水量,即它们的配水不能达到预先决策中的供水目标,且配水量大体随丹江口水库来水的减少而减少,当丹江口水库遇枯时还需降低城六区生态用水以及郊区生活、工业用水的配水量;当北京为枯水年或特枯年时,除城六区生活用水以外的所有用水户的配水量均需根据来水情况进行不同程度的削减,其中城六区工业、农业用水以及郊区农业、生态用水的配水量主要受北京来水水平的约束,丹江口水库来水水平对其供水配置的影响可不予考虑,而城六区生态用水以及郊区生活、工业用水的配置需综合考虑北京和丹江口水库的来水情况,尤其需注意两地同枯时对其配水方案的制定。由上可看出,ITSP 模型结果能够反映不同来水水平下的水资源优化配置情况,当来水情况确定后,它能够对预先制定的供水目标进行实时修正,平衡预期用水效益与缺水损失之间的关系,实现区域用水综合效益最大化,从而很好地解决了区域水资源配置中来水情况不确定的问题。此外,配置结果中出现的区间数表明模型中其他参数的不确定性对配水方案有

一定影响,配水量因相关参数的波动而具有较大的弹性,这也可管理者提供更宽裕的决策空间。

表 6 北京市 2025 年水资源优化配置结果

Tab. 6 Results of optimal allocation of water resources of Beijing for 2025

单位:亿 m<sup>3</sup>

来水水平		城六区				郊区			
		生活	工业	农业	生态	生活	工业	农业	生态
BF	DF	12.37	0.92	0.08	9.88	10.50	2.46	3.66	7.52
	DP	12.37	0.92	0.08	9.88	10.50	2.46	3.66	7.52
	DK	12.37	0.92	0.08	9.88	10.50	2.46	3.66	7.52
	DT	12.37	0.92	0.08	9.88	10.50	2.46	3.66	7.52
BP	DF	12.37	[0.82,0.92]	[0.05,0.08]	9.88	10.50	2.46	[2.56,3.66]	[6.26,7.52]
	DP	12.37	[0.82,0.92]	[0.05,0.08]	9.88	10.50	2.46	[2.56,3.20]	[5.83,7.52]
	DK	12.37	0.82	0.05	9.88	[9.97,10.50]	2.46	2.56	[5.27,7.15]
	DT	12.37	0.82	0.05	[7.61,9.88]	9.97	[2.26,2.27]	2.56	5.27
BK	DF	12.37	0.82	0.05	[9.06,9.88]	[9.97,10.50]	[2.26,2.46]	2.20	[4.51,5.27]
	DP	12.37	0.82	0.05	[8.46,9.88]	[9.97,10.50]	[2.26,2.46]	2.20	[4.51,4.63]
	DK	12.37	0.82	0.05	[7.51,9.72]	9.97	2.26	2.20	4.51
	DT	12.37	0.82	0.05	[6.57,8.71]	9.97	2.26	2.20	4.51
BT	DF	12.37	0.82	0.04	[8.36,9.88]	[9.97,10.44]	[2.26,2.46]	1.83	3.76
	DP	12.37	0.82	0.04	[7.89,9.88]	9.97	[2.26,2.43]	1.83	3.76
	DK	12.37	0.82	0.04	[6.94,9.05]	9.97	2.26	1.83	3.76
	DT	12.37	0.82	0.04	[5.43,7.44]	9.97	2.26	1.83	3.76

注:BF,BP,BK,BT 分别表示北京遭遇丰水年、平水年、枯水年、特枯年;DF,DP,DK,DT 分别表示丹江口水库遭遇丰水年、平水年、枯水年、特枯年。

图 1 展示了北京市 2025 年水资源优化配置结果中不同来水水平下的缺水情况。北京为丰水年时不存在缺水现象,平水年时缺水量为[0,6.46]亿 m<sup>3</sup>,枯水年时缺水量为[3.85,8.63]亿 m<sup>3</sup>,特枯年时缺水量为[5.79,10.90]亿 m<sup>3</sup>,可见当北京处于同一来水水平时,丹江口水库来水情况对缺水量也有较大的影响,其中当北京与丹江口水库同时遭遇枯水年或特枯年时,缺水量为[5.48,10.90]亿 m<sup>3</sup>,缺水率高达[11.57%,23.00%]。这表明在当前供水保障体系下,北京市 2025 年来水水平为多年平均情况下的供水尚不能满足,枯水年和特枯年的供需缺口更大,在北京与丹江口水库同时遇枯时北京市供水风险尤为突出,因此,在近期北京本地水资源条件难以得到改善的情况下,为保障 2025 年北京市供水安全,应完善应急供水储备系统,构建多途径供水保障体系。

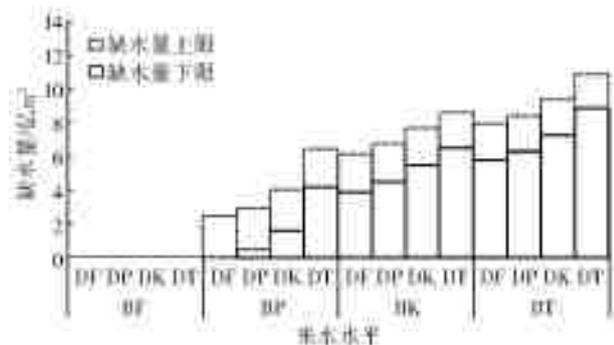


图 1 不同来水水平下的缺水情况

Fig. 1 Water shortage under different inflow conditions

### 2.3 模型优化结果评价

本研究采用 ITSP 模型,引入随机变量和区间数表示不确定性,很好地结合了两阶段随机规划和区间规划。与传统的两阶段随机规划方法相比,区间两阶段随机规划还需对第一阶段决策变量进行最优求解,即在合理的供水目标范围内选取最优的供水目标,减小了传统两阶段随机规划中直接确定供水目标的主观性。图 2 展示了 ITSP 模型所求解的最优化供水目标( $X_{ij}^{+,opt} = X_{ij}^- + \Delta X_{ij} z_{ij,opt}$ )和其他几种确定性供水目标下的配置结果,以供讨论 ITSP 模型配置结果的最优性。结果表明:城六区与郊区各用水户的供水目标取下限值( $X_{ij}^+ = X_{ij}^-$ )时(情形 1),缺水风险很小,但用水综合效益明显小于 ITSP 模型的配置结果,这说明在来水水平较高的情况下,按照预期供水目标安排的生活、生产规模偏小,没能充分地利用水资源发展经济社会;供水目标取上限值( $X_{ij}^+ = X_{ij}^+$ )时(情形 3),北京市 2025 年预期用水收益略高于 ITSP 模型的配置结果,但同时也会面临较大的缺水惩罚,因此用水综合效益低于 ITSP 模型的配置结果;供水目标取中间值( $X_{ij}^+ = X_{ij}^{(mid)}$ )时(情形 2),表示供水决策处于保守派与乐观派之间,用水收益与缺水风险均处于情形 1 与情形 3 之间。由此可见,ITSP 模型的最优决策将与用水收益和缺水风险相联系,能有效平衡区域水资源配置中用水收益与缺水风险之间的关系,实现区域

用水综合效益最大化。此外,由 2.2 节对 ITSP 模型配置结果的分析可知,区间两阶段随机规划还能反映模型的不确定性输入给模型结果带来的影响,有效解决水资源系统与水资源优化配置中的不确定性问题。综上所述,将区间两阶段随机规划的方法应用于不确定条件下的区域水资源优化配置具有很好的合理性与科学性,本研究中 ITSP 模型的优化配置结果可为北京市 2025 年供水目标与水资源优化配置方案的制定以及水资源安全保障措施的分析提供参考依据。

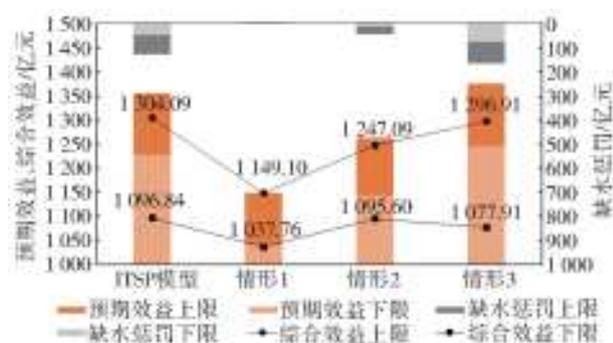


图 2 不同供水目标下的水资源配置结果对比  
Fig. 2 Comparison chart of water resource allocation under different water supply targets

### 3 结论

本文基于区间两阶段随机规划方法进行了北京市 2025 年水资源优化配置的研究,通过求解 ITSP 模型可得北京市 2025 年优化供水目标以及不同来水水平下的配水方案,经分析可总结出以下结论。

(1)通过预测北京市 2025 年城六区与郊区的生活、工业、农业、生态需水,初步划定北京市 2025 年的供水目标范围为 $[40.49, 48.72]$ 亿  $m^3$ ,ITSP 模型求解得出北京市 2025 年优化供水目标为 47.39 亿  $m^3$ ,其中城六区工业用水和郊区农业用水的优化供水目标不足需水预测上限值,表明管理者在制定城六区工业用水和郊区农业用水的供水目标时应采取保守态度。

(2)ITSP 模型结果可反映不同来水水平下的水资源优化配置情况,北京市 2025 年不同来水水平下的优化配置水量为 $[36.49, 47.39]$ 亿  $m^3$ ,用水综合效益为 $[1096.84, 1304.09]$ 亿元。配置结果显示,北京为丰水年时可按预先决策中的优化供水目标充分供水,北京来水水平低于丰水年时供水无法达到目标,随着北京本地与丹江口水库来水水平的降低,首先考虑降低城六区工业、农业用水以及郊区农业、生态用水的配水量,其次考虑降低城六区生态用水以及郊区生活、工业用水的配水量,而城六区生活用

水应始终按照供水目标充分供水。

(3)北京市 2025 年整体供水形势不容乐观,除北京为丰水年时不存在缺水现象外,其他来水水平下都将可能存在缺水现象,尤其当北京与丹江口水库同时遭遇枯水年或特枯年时供水缺口可高达 $[5.48, 10.90]$ 亿  $m^3$ ,缺水率为 $[11.57\%, 23.00\%]$ 。因此,需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。

(4)本研究所采用的 ITSP 模型同时引入区间数和概率分布表示区域水资源配置过程中的不确定性,扩展了现有的两阶段随机规划和区间规划,既能反映水资源系统的不确定性因素给水资源配置结果带来的影响,解决水资源优化配置中的不确定性问题,又能将用水收益和缺水风险相联系,有效平衡区域水资源配置中用水收益与缺水风险之间的关系,模型结果具有一定的实际参考价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 高璐.北京市城市多水源配置研究[D].大连:辽宁师范大学,2017. (GAO L. Study on city's multi-water allocation in Beijing [D]. Dalan: Liaoning Normal University,2017. (in Chinese))
- [2] 张成龙,郭萍,赵建明.不确定条件下的区间两阶段模糊可信性约束规划配水模型研究[J].中国农村水利水电,2016(8):97-101. (ZHANG C L, GUO P, ZHAO J M. An interval two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming for optimal irrigation water allocation under uncertainty[J]. China Rural Water and Hydropower,2016(8):97-101. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2016.08.023.
- [3] 陶子乐滔,王静,蔡怡馨,等.基于可信性规划的昆明市水资源优化配置模型[J].水电能源科学,2015,33(7):30-33,29. (TAO Z Y T, WANG J, CAI Y X, et al. A credibility planning model of optimal water resources allocation for Kunming City[J]. Water Resources and Power,2015,33(7):30-33,29. (in Chinese))
- [4] 叶健,刘洪波,闫静静.不确定性模糊多目标模型在生态城市水资源配置中的应用[J].环境科学学报,2012,32(4):1001-1007. (YE J, LIU H B, YAN J J. Application of inexact fuzzy multi-objective model on water resources allocation in an ecological city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 1001-1007. (in Chinese)) DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2012. 04. 005.
- [5] 张静.不确定条件下城市多水源供水优化配置[D].北京:华北电力大学,2008. (ZHANG J. Optimal allocation of multi-sources water systems for city under uncertainty [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008. (in Chinese))

- [6] 付银环,郭萍,方世奇,等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 73-81. (FU Y H, GUO P, FANG S Q, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 73-81. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 05. 010.
- [7] BEKRI E, DISSE M, YANNOPOULOS P. Optimizing water allocation under uncertain system conditions in alfeios river basin (Greece), part A: two-stage stochastic programming model with deterministic boundary intervals[J]. Water, 2015, 7(10): 5305-5344. DOI: 10. 3390/w7105305.
- [8] NEMATIAN J. An extended two-stage stochastic programming approach for water resources management under uncertainty[J]. Journal of Environmental Informatics, 2016, 27(2): 72-84. DOI: 10. 3808/jei. 201600334.
- [9] BEKRI E, DISSE M, YANNOPOULOS P. Optimizing water allocation under uncertain system conditions for water and agriculture future scenarios in alfeios river basin (Greece)-part B: fuzzy- boundary intervals combined with multi-stage stochastic programming model [J]. Water, 2015, 7(11): 6427-6466. DOI: 10. 3390/w7116427.
- [10] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 844-849. (ZHANG Y N, TIAN F Q, HU H C, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(07): 844-849. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 07. 011.
- [11] 甘治国,蒋云钟,鲁帆,等. 北京市水资源配置模拟模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 91-95, 102. (GAN Z G, JINAG Y Z, LU F, et al. Water resources deployment model for Beijing City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 91-95, 102. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2008. 01. 011.
- [12] 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 W H, YIN J H, ZHAO J S, 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)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 02. 012.
- [13] 张晓军,侯汉坡. 基于跨行业水权交易的北京市水资源优化配置研究[J]. 首都经济贸易大学学报, 2010, 12(3): 68-73. (ZHANG X J, HOU H P. Optimal allocation of Beijing's water resources based on cross-sector water rights trading[J]. Journal of Capital University of Economics and Business, 2010, 12(3): 68-73. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-2700. 2010. 03. 011.
- [14] 胡泽华. 北京市水资源优化配置方案比选[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. (HU Z H. Comparison of water resources optimal allocation schemes in Beijing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese))
- [15] 申梦阳,赵建平,桂东伟,等. 基于两阶段随机规划方法的绿洲水资源优化配置[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 233-238, 245. (SHEN M Y, ZHAO J P, GUI D W, et al. Study on the optimal allocation of oasis water resources based on the two-stages stochastic programming method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 233-238, 245. (in Chinese)) DOI: 10. 7606 /j. issn. 1000-7601. 2018. 04. 33.
- [16] 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. (China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese))
- [17] 曹徐齐,阮辰旻. 全球主要城市供水管网漏损率调研结果汇编[J]. 净水技术, 2017, 36(4): 6-14. (CAO X Q, RUAN C M. Compilation of investigation on water loss rate of water supply pipelines in global major cities [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(4): 6-14. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2017. 04. 002.
- [18] 吴浩云,刁训娣,曾赛星. 引江济太调水经济效益分析——以湖州市为例[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 888-892. (WU H Y, DIAO X T, ZENG S X. Analysis of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu lake: Case study in Huzhou City [J]. Advance in Water Science, 2008, 19(6): 888-892. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2008. 06. 024.
- [19] 高波,郭菊娥,薛欣喜. 沿海城市多水源多用户供水优化配置研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2013(2): 19-24. (GAO B, GUO J E, XUE X X. A study of the optimization of water supply based on various water sources and consumers in coastal cities [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013(2): 19-24. (in Chinese))
- [20] 席清海,冯平. 引黄济津应急调水的费用效益分析[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2012, 14(5): 396-400. (XI Q H, FENG P. Cost-benefit analysis of water diversion from Yellow River to Tianjin [J]. Journal of Tianjin University (Social Sciences), 2012, 14(5): 396-400. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-4339. 2012. 05. 003.

(下转第 137 页)

- on the ecology and cause analysis[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2016, 38(2): 5-11. (in Chinese))
- [22] 付强,戴长雷,王斌,等. 水资源系统分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012: 187-196. (FU Q, DAI C L, WANG B, et al. Water resources system analysis [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012: 187-196. (in Chinese))
- [23] 吴易雯,李莹杰,张列宇,等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1091-1102. (WU Y W, LI Y J, ZHANG L Y, et al. Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1091-1102. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2017. 0507.
- [24] 高明美,孙涛,张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 150-154. (GAO M M, SUN T, ZHANG K. Dynamic fuzzy comprehensive evaluation on the atmosphere environmental quality of Jinan city based on the multiple super-scale weighting method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 150-154. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2014. 09. 021.
- [25] 刚什婷,贾涛,邓英尔,等. 基于熵权法的集对分析模型在蛤蟆通流域地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 23-27. (GANG S T, JIA T, DENG Y E, et al. Assessment of groundwater quality in Hamotong Drainage basin by using model of set pair analysis based on entropy weight method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(9): 23-27. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20170156.
- [26] 努尔兰·哈再孜,沈永平,马哈提·穆拉提别克. 气候变化对阿尔泰山乌伦古河流域径流过程的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 699-705. (NUERLAN H, SHEN Y P, MAHAT M. Impacts of climate change on hydrological processes in the Ulungur River watershed, Altay Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 699-705. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2014. 0084.
- [27] 黄智华,周怀东,薛滨,等. 人类活动对乌伦古湖环境演化的影响[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 60-62. (HUANG Z H, ZHOU H D, XUE B, et al. The influence of human activities on the environmental evolution of Ulungur Lake [J]. Yellow River, 2011, 33(5): 60-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2011. 05. 026.
- 
- (上接第 41 页)
- [21] 北京市水务局. 北京市“十三五”时期水资源保护利用规划 [S]. 2016. (Beijing Water Authority. Water resources protection and utilization plan for the 13th five-year plan period of Beijing [S]. 2016. (in Chinese))
- [22] 徐鹤. 南水北调工程受水区多水源水价研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013. (XU H. Study on water price of multi-water resources in the reception basin of the South-to-North Water Transfer Project; In Beijing as a case [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [23] 陈兴茹,刘树坤. 论经济合理的生态用水量及其计算模型(II)——应用[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6): 1-5. (CHEN X R, LIU S K. Rational volume of ecological water consumption and its calculation model II: Application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2006. 06. 001.
- [24] 倪红珍. 基于绿色核算的水资源价值与价格研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2004. (NI H Z. A study on water resources value and price of environment and economy coordinating development [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. (in Chinese))
- [25] 北京市水务局. 关于本市水价有关问题的通知 [EB/OL]. <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300795/300797/749090/index.html>, 2018-01-22/2019-03-12. (Beijing Water Authority. Notice on the water price in Beijing [EB/OL]. (in Chinese))
- [26] 北京市水务局. 关于调整北京市再生水价格的通知 [EB/OL]. <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300817/300819/320852/index.html>, 2018-01-01/2019-03-12. (Beijing Water Authority. Notice on the adjustment of the price of renewable water in Beijing [EB/OL]. (in Chinese))
- [27] 城市供水统计年鉴 [M]. 北京:中国城镇供水协会, 2017. (Statistical yearbook of urban water supply [M]. Beijing: China Urban Water Supply Association, 2015. (in Chinese))
- [28] 裴永刚,田海涛. 北京市农业水价综合改革分析 [J]. 北京水务, 2018(4): 29-32. (PEI Y G, TIAN H T. Comprehensive reform analysis of agricultural water price in Beijing [J]. Beijing Water, 2018(4): 29-32. (in Chinese))