

基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用

姜秋香,何晓龙,王子龙,吴云星,廖浩宇

(东北农业大学水利与土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:针对水资源系统中供需水存在的不确定性和随着时间推移呈现的动态性,基于黑龙江省历年供水、用水及社会经济等数据确定规划年的水资源参数及经济参数,采用区间参数反映系统中的不确定性,利用多阶段随机规划反映水资源配置中的动态性,进而建立了多水源、多用水户的区间多阶段随机规划模型,模型通过平衡水资源配置系统中用户配置水量、系统风险与系统收益三者关系,可实现系统最大经济效益。利用该模型对黑龙江省水资源配置问题进行研究,结果表明:规划年黑龙江省生活、工业和生态用水均可以得到满足,农业用水在丰水年基本得到满足,枯水年缺水量为15.32亿~49.40亿 m^3 ,与现状年相比,农业缺水得到一定程度的缓解;水源供给方面,地表供水比例稳步提升,可以较好保护地下水源。

关键词:水资源优化配置;不确定性;多阶段随机规划;黑龙江省

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0001-07

A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application//JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, WU Yunxing, LIAO Haoyu (*School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*)

Abstract: In view of the uncertainty of water supply and demand in a water resources system and its dynamics with the passage of time, based on the data of water supply, water consumption and social economy in Heilongjiang Province over the years, the water resources parameters and economic parameters in the planning years were determined. The uncertainty in the system was reflected by using interval parameters, and the dynamics in water resources allocation was reflected by using multi-stage random planning. An interval multi-stage random planning model with multiple water sources and multi-purpose users was then established, based on which the water resources allocation in Heilongjiang Province was studied. The results show that the domestic, industrial and ecological water consumption in Heilongjiang can be met in the planning years, and the agricultural water consumption is basically met in wet years, with the water shortage of 1.532 billion to 4.94 billion m^3 in dry years. Compared with the current years, the agricultural water shortage has been alleviated to some extent. In terms of water supply, the proportion of surface water supply steadily increases, which can better protect underground water sources.

Key words: optimal allocation of water resources; uncertainty; multi-stage stochastic programming; Heilongjiang Province

水资源作为人类生活的一种重要资源,对社会经济的稳定繁荣、环境生态的可持续发展具有重要作用^[1-2]。但随着经济的快速增长,社会对水资源的需求量急速增加,同时水资源污染、水资源短缺等水资源问题也开始凸显^[3-4],导致水资源供需矛盾不断加剧,如何合理、高效地分配水资源成为水资源领域亟待解决的问题^[5]。水资源优化配置作为解决水

资源高效分配的方法,得到了广泛的应用及发展,并产生了多种优化配置方法。贺北方等^[6]基于可持续发展理论,以社会、经济、环境的综合效益最大为目标,建立区域水资源优化配置模型,并探讨了遗传算法在区域水资源优化配置中的应用。邵东国等^[7]从生态环境保护、水权转让、利益补偿、水价形成和集中控制等方面探讨了水资源配置机制,构建

基金项目:国家自然科学基金(42071243);黑龙江省科学基金(YQ2020E001)
作者简介:姜秋香(1982—),女,教授,博士,主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail:jiangqiuxiang914@163.com
通信作者:王子龙(1982—),男,教授,博士,主要从事寒区水土资源高效利用研究。E-mail:wangzilong2017@126.com

了基于水资源净经济效益最大的水资源优化配置模型,并在郑州市取得了良好的实用性成果。黄显峰等^[8]将多目标混沌优化算法应用于水资源优化配置中,避免了优化搜索过程陷入局部极小点的问题。杜佰林等^[9]采用模拟退火粒子群算法对陕西省渭南市大荔县水资源配置方案进行了研究。

同时,水资源配置系统中可供水量、需水量和经济参数等都存在不确定性^[10],传统的确定性研究方法不能完全反映水资源系统的情况,进而众多学者将不确定性的理论方法引入水资源优化配置领域^[11-13]。Huang等^[14]将不确定性理论引入水资源管理中,建立了不确定条件下水资源管理的两阶段随机规划模型。付强等^[15]引入随机数和区间数表示水资源系统中存在的不确定性,建立多阶段随机规划模型解决多水源、不同来水情景下水稻不同生育期的水资源优化配置问题。为了反映系统环境的动态变化,多阶段随机规划被应用于水资源管理领域,并取得一定成果^[16-17]。Dai等^[18]将多阶段灌溉用水分配模型应用于漳卫南流域,用于解决多种作物的灌溉目标以及不同生长阶段的水资源分配方案。莫淑红等^[19]引入区间数和概率密度函数到水资源分配的区间多阶段随机规划模型中,探讨了不同情景下水库对多用户供水方案的问题。本文在上述学者研究基础之上,进一步研究区间多阶段随机规划模型,考虑不同水源在不同来水情景下对多用户联合供水,进而建立可用于解决多水源、多用户的区域水资源优化配置模型。

1 模型构建及求解

1.1 模型构建

区域水资源优化配置是一个复杂的系统过程,供水情况受来水影响存在随机性^[20]。水资源优化配置目的是使水资源得到合理高效分配,满足各用水户的需求,同时使系统的净经济效益达到最大化。不同的水资源规划周期具有动态性,同时水资源系统中各要素具有不确定性,针对此问题,可通过建立多阶段随机规划模型解决^[21]。该模型以系统用水经济效益最大为目标,各用水户的配水水量为决策变量,引入用水经济效益、缺水惩罚系数来确定水资源分配方案。在每一个阶段预先确定各用水户初始供水目标,由于供水情况具有随机性,若供水不能得到满足,需要减少用水量或通过外调水源进行补充,都会产生额外的费用,为了降低用水成本,引入缺水惩罚系数,使用水成本降到最低;若供水得到满足,其剩余水量可以转移到下一阶段加以利用,实现水资源配置系统的动态关联^[22]。多阶段水资源规划

模型的目标函数:

$$\max f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ij} W_{ij} - E \left(\sum_{i=1}^I C_{i1} D_{iQ_1} \right) - E \left(\sum_{i=1}^I C_{2i} D_{iQ_2} \right) - \cdots - E \left(\sum_{i=1}^I C_{Ti} D_{iQ_T} \right) \quad (1)$$

式中: f 为系统在整个规划周期的净经济效益值,亿元; T 为规划周期总数, $t=1,2,3$ 表示第1、第2和第3阶段; I 为用水户总数, $i=1,2,3,4$ 表示生活、农业、工业和生态4个用水户; J 为水源总数, $j=1,2$ 表示地表水源和地下水源; B_{ij} 为第 t 周期水源 j 向用水户 i 供水所创造的净经济效益,元/ m^3 ; W_{ij} 为第 t 周期水源 j 向用水户 i 的供水目标,亿 m^3 ; C_{ii} 为第 t 周期用水户 i 未达到供水目标时单位缺水惩罚,其值大于单方水净收益,元/ m^3 ; D_{iQ_t} 为当来水总量为 Q_t 时用水户 i 未达到供水目标 W_{ii} 时的缺水量,亿 m^3 ; Q_t 为第 t 周期来水总量,亿 m^3 ; $E(\cdot)$ 为随机变量的期望值。

约束条件包括可供水量约束、余水约束和非负约束。包括可供水量约束、余水约束和非负约束。

a. 可供水量约束:

$$\sum_{i=1}^I (W_{ij} - D_{jiQ_t}) \leq Q_{tj} + \varepsilon_{(t-1)j} \quad (\forall t, j) \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_{(t-1)j}$ 为 $t-1$ 周期 j 水源的剩余水量,亿 m^3 。

b. 余水约束:

$$\varepsilon_{(t-1)j} = Q_{(t-1)j} - \sum_{i=1}^I (W_{(t-1)ij} - D_{jiQ_{t-1}}) + \varepsilon_{(t-2)j} \quad (\forall j; t=2,3,\dots,T) \quad (3)$$

c. 非负约束:

$$W_{it\max} \geq W_{it} \geq D_{iQ_t} \geq 0 \quad (\forall t, i) \quad (4)$$

式中 $W_{it\max}$ 为第 t 周期用水户 i 的最大允许供水水量,亿 m^3 。

为求解上述模型,需将其转化为线性模型。 Q_t 是一个随机变量,与降雨、径流等水文要素关系密切,可引入概率密度函数表示其不确定性。设 Q_t 有 K_t 种情景,第 k_t 种情景出现的概率为 P_{tk} ,此时的来水为 Q_{tk} ,且 $P_{tk} > 0$, $\sum_{k=1}^{K_t} P_{tk} = 1$,情景总数 $K = \sum_{t=1}^T K_t$,于是模型可以进行如下的改写:

$$E \left(\sum_{i=1}^I C_{ii} D_{iQ_t} \right) = \sum_{i=1}^I C_{ii} \left(\sum_{k=1}^{K_t} P_{tk} D_{iki} \right) \quad (5)$$

模型中来水量 Q_t 、初始供水目标和供水净经济效益均具有不确定性,为了描述此类参数的不确定性,将区间参数的概念引入到模型中,区间参数上下限表示不确定变量数值的上下限,进而建立区间多阶段随机规划模型。

目标函数:

$$\max f^{\pm} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ij}^{\pm} W_{ij}^{\pm} - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{K_t} \sum_{i=1}^I P_{tk} C_{ti}^{\pm} D_{tki}^{\pm} \quad (6)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^I (W_{ji}^{\pm} - D_{tkj}^{\pm}) \leq Q_{tk}^{\pm} + \varepsilon_{(t-1)kj}^{\pm} \quad (\forall k, t, j) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{\pm} = Q_{(t-1)k}^{\pm} - \sum_{i=1}^I (W_{(t-1)ki}^{\pm} - D_{(t-1)ki}^{\pm}) + \varepsilon_{(t-2)k}^{\pm} \quad (\forall k; t = 2, 3, \dots, T) \quad (8)$$

$$W_{i\max}^{\pm} \geq W_{it}^{\pm} \geq D_{tki}^{\pm} \geq 0 \quad (\forall i, t, k) \quad (9)$$

1.2 模型求解

为了使用线性规划的方法对模型进行求解,需要将第一阶段的决策变量在随机事件发生前确定^[23-25]。初始供水目标 $W_{it}^{\pm}$ 以区间的形式给出,为了确定其取值,引入决策变量 η_{it} , 令 $W_{it}^{\pm} = W_{it}^{-} + \Delta W_{it} \eta_{it}$, 其中 $\Delta W_{it} = W_{it}^{+} - W_{it}^{-}$, $\eta_{it} \in [0, 1]$ 。此时只需确定 η_{it} 的值, 便可确定得到 $W_{it}^{\pm}$ 的确定值。当决策变量 $\eta_{it} = 0$ 时, $W_{it}^{\pm}$ 取最小值, 表示此时水资源规划处于较为保守状态, 水资源得到满足几率较大, 面临的水资源风险较小, 但同时系统的净经济效益也较低; 当决策变量 $\eta_{it} = 1$ 时, 此时 $W_{it}^{\pm}$ 取最大值, 表明此时的水资源规划处于相对积极状态, 水资源需求如果能够得到满足将获得更高的经济效益, 但如果水资源需求没有得到满足也将产生较大的经济惩罚, 面临的水资源风险较高^[26]。依据交互式算法^[27], 可将此不确定性模型转化为 2 个确定的子模型。由于模型目标函数为经济效益最大, 故先求解与其对应的上限模型:

$$\max f^{+} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ij}^{+} (W_{ij}^{-} + \eta_{it} \Delta W_{ij}) - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{K_t} \sum_{i=1}^I P_{tk} C_{ti}^{-} D_{tki}^{-} \quad (10)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^I (W_{ij}^{-} + \eta_{it} \Delta W_{ij} - D_{tkj}^{-}) \leq Q_{tk}^{+} + \varepsilon_{(t-1)kj}^{+} \quad (\forall t, k, j) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{+} = Q_{(t-1)k}^{+} - \sum_{i=1}^I (W_{(t-1)i}^{-} + \eta_{(t-1)i} \Delta W_{(t-1)i} - D_{(t-1)ki}^{-}) + \varepsilon_{(t-2)k}^{+} \quad (\forall k; t = 2, 3, \dots, T) \quad (12)$$

$$W_{i\max}^{+} \geq W_{it}^{-} + \eta_{it} \Delta W_{it} \geq D_{tki}^{-} \geq 0 \quad (\forall i, t, k) \quad (13)$$

$$0 \leq \eta_{it} \leq 1 \quad (\forall t, i) \quad (14)$$

模型中 D_{tki}^{-} 和 η_{it} 为决策变量, 求解上限模型可得 D_{tki}^{-} 和 η_{it}^{opt} , 最优配水目标为 $w_{it}^{+} = w_{it}^{-} + \Delta w_{it}$, 将最优配水目标代入下限模型:

$$\max f^{-} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ij}^{-} (W_{ij}^{-} + \eta_{it}^{\text{opt}} \Delta W_{it}) -$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^I (W_{ij}^{-} + \eta_{it}^{\text{opt}} \Delta W_{ij} - D_{tkj}^{+}) \leq Q_{tk}^{-} + \varepsilon_{(t-1)kj}^{-} \quad (\forall t, k, j) \quad (16)$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{-} = Q_{(t-1)k}^{-} - \sum_{i=1}^I (W_{(t-1)i}^{-} + \eta_{(t-1)i}^{\text{opt}} \Delta W_{(t-1)i} - D_{(t-1)ki}^{+}) + \varepsilon_{(t-2)k}^{-} \quad (\forall k; t = 2, 3, \dots, T) \quad (17)$$

$$W_{i\max}^{-} \geq W_{it}^{-} + \eta_{it}^{\text{opt}} \Delta W_{it} \geq D_{tki}^{+} \geq 0 \quad (\forall i, t, k) \quad (18)$$

$$D_{tki}^{+} \geq D_{tki}^{-} \quad (\forall t, k, i) \quad (19)$$

模型中 D_{tki}^{+} 为决策变量, 求解下限模型可得 D_{tki}^{+} 和 f_{opt}^{-} 。

可得模型优化结果:

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

$$D_{tki}^{\pm} = [D_{tki}^{-}, D_{tki}^{+}] \quad (\forall t, k, i) \quad (21)$$

式中 f_{opt}^{-} 和 f_{opt}^{+} 分别为系统的水资源经济效益最优值上界和下界。

最优水资源分配量 $O_{tki}^{\pm}$ 为

$$O_{tki}^{\pm} = W_{tki}^{\pm} - D_{tki}^{\pm} \quad (\forall t, k, i) \quad (22)$$

2 模型应用

2.1 研究区域概况

黑龙江省位于我国东北部, 省域面积 47.3 万 km², 农业用地占比高达 83.5%, 是我国重要的粮食生产基地^[28], 境内有黑龙江、乌苏里江、松花江、牡丹江和绥芬河五大水系, 水资源较为丰富。黑龙江省作为农业大省, 2018 年(现状年)总用水量为 343.94 亿 m³, 其中农业用水为 304.84 亿 m³, 占总用水量的 88.63%, 同时多年平均灌溉系数为 0.53, 低于全国平均值, 造成严重的水资源浪费^[29]。供水方面, 黑龙江省地表水源供水为 191.19 亿 m³, 占总供水的 55.59% (表 1)。黑龙江省降水分布极不规律, 常出现连丰、连枯的情况, 进一步加剧黑龙江省水资源供需关系, 导致水资源配置系统面临较大风险^[30-31]。

表 1 2018 年黑龙江省供用水情况 单位: 亿 m³

项目	地表水源供水	地下水源供水	总用水
生活用水	7.36	8.31	15.67
农业用水	166.31	138.53	304.84
工业用水	14.38	5.46	19.84
生态用水	3.14	0.45	3.59
总供水	191.19	152.75	343.94

注: 数据来源于文献^[32]; 由于其他水源供水量仅占总供水量的 0.26%, 因此将其并入地表水源供水。

2.2 参数确定

本研究以地表水和地下水作为供水水源, 用水户

包括生活、农业、工业和生态。依据国家“十四五”规划和黑龙江省“十四五”规划,同时考虑预测精度等问题,选定3个阶段的规划年分别为2025年、2026年和2027年。依据黑龙江省历年水资源相关数据、经济数据^[32-34],确定不同规划周期内各用水户的单方水经济收益,以及供水不能得到满足时的单方水经济惩罚^[35](表2)。根据黑龙江省历年降雨资料,确定规划周期内出现枯、平、丰3种来水年份的概率分别为0.2、0.6和0.2,进而确定各规划周期不同水平的可用水量(表3)。通过分析黑龙江省历年用水数据,确定其规划周期各用水户配水目标及最大允许配水量(表4)。

表 2 不同规划周期各用水户的单方水经济收益和惩罚

单位:元/m³

用水户	单方水经济收益			单方水经济惩罚		
	<i>t</i> = 1	<i>t</i> = 2	<i>t</i> = 3	<i>t</i> = 1	<i>t</i> = 2	<i>t</i> = 3
生活	65 ~ 78	67 ~ 80	70 ~ 84	78 ~ 94	80 ~ 96	84 ~ 100
农业	17 ~ 20	18 ~ 21	19 ~ 22	20 ~ 24	22 ~ 26	23 ~ 28
工业	70 ~ 84	75 ~ 90	80 ~ 96	84 ~ 100	90 ~ 108	96 ~ 115
生态	82 ~ 98	85 ~ 102	90 ~ 108	98 ~ 118	102 ~ 122	108 ~ 130

表 3 不同规划周期各水源可用水量

供水水源	<i>t</i>	可用水量/亿 m ³		
		枯水年	平水年	丰水年
地表供水	1	180.79 ~ 199.82	185.63 ~ 205.17	192.57 ~ 212.84
	2	182.59 ~ 201.81	187.49 ~ 207.22	194.49 ~ 214.96
	3	184.42 ~ 203.83	189.36 ~ 209.29	196.44 ~ 217.11
地下供水	1	138.51 ~ 153.09	143.07 ~ 158.13	150.39 ~ 166.22
	2	138.93 ~ 153.55	143.50 ~ 158.60	150.84 ~ 166.71
	3	139.34 ~ 154.01	143.93 ~ 159.08	151.29 ~ 167.21

表 4 不同规划周期各用水户配水目标和最大允许配水量

<i>t</i>	配水目标/亿 m ³			
	生活	农业	工业	生态
1	15.43 ~ 17.05	319.03 ~ 352.61	16.44 ~ 18.17	4.00 ~ 4.42
2	16.20 ~ 17.90	334.98 ~ 370.24	15.94 ~ 17.62	4.40 ~ 4.86
3	17.01 ~ 18.80	351.73 ~ 388.75	15.46 ~ 17.09	4.84 ~ 5.35
最大允许配水量	20.00	360.00	30.00	8.00

2.3 情景分析

根据规划期内来水 Q_t 的情况,第一阶段($t = 1$)来水有低(枯水年)、中(平水年)及高(丰水年)3种情景,第二阶段($t = 2$)在第一阶段的每种情况下又有3种情况,共计9种情景,依此类推,第三阶段($t = 3$)会有27种情景。本研究包括生活、农业、工业和生态4个用水户,则第一阶段有12个节点,形成4-12-36-108的情景树。由于产生数据量过大,本文选择其中具有代表性的来水情景进行分析,第一阶段(2025年)选取(L,M,H)代表来水为低、中、高3种情景进行分析;为应对极端来水情况,第二阶

段(2026年)选取(L-L,M-M,H-H)代表低-低、中-中和高-高3种来水情景作为代表性情景、第三阶段(2027年)选取(L-L-L,M-M-M,H-H-H)代表来水为低-低-低、中-中-中和高-高-高3种情景,作为代表性来水情景,以此对连续枯水年、平水年和丰水年的水资源分配情况进行分析。

2.4 模型结果与讨论

依据式(5)~(9)建立的模型,可得各阶段不同情景下各用水户的水资源分配情况如表5~7所示。

表 5 第一阶段水资源配置情况

节点 (<i>tki</i>)	用水 户	来水 水平	概 率	供水 目标/ 亿 m ³	缺水/ 亿 m ³	最优配水	
						地表供水/ 亿 m ³	地下供水/ 亿 m ³
111	生活	枯	0.2	17.05	0	8.53	8.52
112	农业	枯	0.2	339.18	25.91 ~ 59.52	154.43 ~ 173.46	125.23 ~ 139.81
113	工业	枯	0.2	18.17	0	13.63	4.54
114	生态	枯	0.2	4.42	0	4.20	0.22
121	生活	平	0.6	17.05	0	8.53	8.52
122	农业	平	0.6	339.18	15.52 ~ 50.12	159.27 ~ 178.81	129.79 ~ 144.85
123	工业	平	0.6	18.17	0	13.63	4.54
124	生态	平	0.6	4.42	0	4.20	0.22
131	生活	丰	0.2	17.05	0	8.53	8.52
132	农业	丰	0.2	339.18	0 ~ 35.86	166.21 ~ 186.48	137.11 ~ 152.94
133	工业	丰	0.2	18.17	0	13.63	4.54
134	生态	丰	0.2	4.42	0	4.20	0.22

注:节点 tki 代表第 t 阶段、第 k 种情景、第 i 用水户,下同。

表 6 第二阶段水资源配置情况

节点 (<i>tki</i>)	用水 户	来水 水平	联合 概率	供水 目标/ 亿 m ³	缺水/ 亿 m ³	最优配水	
						地表供水/ 亿 m ³	地下供水/ 亿 m ³
211	生活	枯-枯	0.04	17.90	0	8.95	8.95
212	农业	枯-枯	0.04	335.69	20.71 ~ 54.55	155.80 ~ 175.02	125.34 ~ 139.96
213	工业	枯-枯	0.04	17.62	0	13.22	4.40
214	生态	枯-枯	0.04	4.86	0	4.62	0.24
251	生活	平-平	0.36	17.90	0	8.95	8.95
252	农业	平-平	0.36	335.69	10.25 ~ 45.08	160.70 ~ 180.43	129.91 ~ 145.01
253	工业	平-平	0.36	17.62	0	13.22	4.40
254	生态	平-平	0.36	4.86	0	4.62	0.24
291	生活	丰-丰	0.04	17.90	0	8.95	8.95
292	农业	丰-丰	0.04	335.69	0 ~ 30.50	167.94 ~ 188.41	137.25 ~ 153.12
293	工业	丰-丰	0.04	17.62	0	13.22	4.40
294	生态	丰-丰	0.04	4.86	0	4.62	0.24

由区间多阶段随机规划模型结果可知,第一阶段时,决策变量 $\eta_{11\text{opt}} = 1$, $\eta_{12\text{opt}} = 0.6$, $\eta_{13\text{opt}} = 1$, $\eta_{14\text{opt}} = 1$,此时生活、农业、工业和生态的供水目标分别为17.05亿 m³、339.18亿 m³、18.17亿 m³和4.42亿 m³;第二阶段时,决策变量 $\eta_{21\text{opt}} = 1$, $\eta_{22\text{opt}} = 0.3$, $\eta_{23\text{opt}} = 1$, $\eta_{24\text{opt}} = 1$,此时生活、农业、工业和生态

表 7 第三阶段水资源配置情况

节点 (<i>thi</i>)	用水 户	来水 水平	联合 概率	供水 目标/ 亿 m ³	缺水/ 亿 m ³	最优配水	
						地表供水/ 亿 m ³	地下水供水/ 亿 m ³
311	生活	枯-枯-枯	0.008	18.80	0	9.40	9.40
312	农业	枯-枯-枯	0.008	331.92	15.32 ~ 49.40	157.12 ~ 176.53	125.40 ~ 140.07
313	工业	枯-枯-枯	0.008	17.09	0	12.82	4.27
314	生态	枯-枯-枯	0.008	5.35	0	5.08	0.27
3141	生活	平-平-平	0.216	18.80	0	9.40	9.40
3142	农业	平-平-平	0.216	331.92	4.79 ~ 39.87	162.06 ~ 181.99	129.99 ~ 145.14
3143	工业	平-平-平	0.216	17.09	0	12.82	4.27
3144	生态	平-平-平	0.216	5.35	0	5.08	0.27
3271	生活	丰-丰-丰	0.008	18.80	0	9.40	9.40
3272	农业	丰-丰-丰	0.008	331.92	0 ~ 13.75	174.98 ~ 195.65	143.19 ~ 159.11
3273	工业	丰-丰-丰	0.008	17.09	0	12.82	4.27
3274	生态	丰-丰-丰	0.008	5.35	0	5.08	0.27

的供水目标分别为 17.90 亿 m³、335.69 亿 m³、17.62 亿 m³ 和 4.86 亿 m³；第三阶段时,决策变量 $\eta_{31\text{opt}}=1, \eta_{32\text{opt}}=0, \eta_{33\text{opt}}=1, \eta_{34\text{opt}}=1$, 此时生活、农业、工业和生态的供水目标分别为 18.80 亿 m³、331.92 亿 m³、17.09 亿 m³ 和 5.35 亿 m³。该结果与表 4 对比可知,每一个阶段,对于生活、工业和生态用水户,其供水目标均取上界值,农业用水户的供水目标由区间的中间值逐步调整为下界值。

由于各用水户的单方水经济收益由高到低依次为生活、工业、生态和农业,因此模型中供水优先级依次为生活、工业、生态,最后为农业。由第一阶段不同情景条件下水资源的分配情况(表 5),可知 3 种水情况下黑龙江省农业用水均存在缺口,并且随着来水情况的变差,其农业缺水量从 0 增加到 59.52 亿 m³,缺水率最高达 17.54%,将造成较为严重的农作物减产。而该阶段 3 种来水情景下生活、工业和生态用水均能得到满足,这是因为生活和生态用水与居民生活息息相关,从社会和谐稳定和保护环境的角度出发,其供水应优先得到满足,工业用水有较高的经济效益,故其供水优先级也应在农业用水之前。

表 7 为第三阶段 3 种具有代表性情景的水资源分配方案,当处于最差来水情景即连续枯水年($P=0.008$)时,黑龙江省总缺水量为 15.32 亿~49.40 亿 m³,全部集中在农业用水。由于此阶段管理者降低了其预定配水目标,此时的农业缺水率为 4.62%~14.88%,缺水率较第一阶段枯水情景出现了下降。当来水处于一般情景即连续平水年($P=0.216$)时,黑龙江省总缺水量为 4.79 亿~39.87 亿 m³,较最差来水情景有了一定好转。当处于最好来水情景即连

续丰水年($P=0.008$)时,黑龙江省缺水情况已出现较大改善,其缺水量最高仅为 13.75 亿 m³,各项条件均取理想状况时,此情景下各用水户供水均可得到满足。由不同水源供水情况可知,在不同来水情景下生活、工业和生态的供水情况均未发生变化,随着来水情况的好转,地表水源和地下水源对农业供水均呈现出增加趋势,其中地下水源增幅明显高于地表水源。虽然极端情况(连续枯水年)出现的概率较低,但该情况一旦出现将会造成严重的缺水,带来较大的经济损失,决策者应统筹考虑,确保在丰水年避免水资源浪费,在枯水年有相应的对策,降低因缺水而造成较大损失,确保系统获得较大经济效益。

由模型优化的黑龙江省水资源分配方案与现状年(2018 年)各用水户用水(表 1)对比可知,不同规划年的生活、农业和生态用水均呈现增加趋势,这是由于居民生活水平提高、农田灌溉面积增加和对生态环境的重视引起的。其中,农业用水增量最大,第三阶段(2027 年)较现状年增加 12.33 亿~26.08 亿 m³,增幅为 4.04%~8.56%;生态用水增加量最小为 1.85 亿 m³。与现状年相比,不同规划年黑龙江省工业用水呈现减少趋势,其中 2027 年工业用水将减少 2.75 亿 m³,减幅为 13.86%,主要与生产技术和设备的升级和淘汰部分高耗水产业有关。在水源供给方面,黑龙江省地表水源的供给比例由现状年 55.59% 逐步提升到 56.96%,有利于进一步提高地表水资源利用率和保护地下水资源。

用户配置水量、系统风险与系统收益三者密切相关,在来水量不确定的情况下,如果决策者追求高的经济效益而设定高的用水需求,会面临用水不能得到满足,造成较大的经济惩罚风险;如果决策者设定较低的用水需求,面临缺水的风险较小,但也会造成水资源浪费,降低系统的经济效益。

根据区间多阶段随机规划模型求解的水资源配置方案可知,黑龙江省最终的用水经济效益 $f_{\text{opt}}^*=[22833.17 \text{ 亿元}, 30920.55 \text{ 亿元}]$,代表黑龙江省 2 种最极端来水情况(连续枯水年、连续丰水年)的用水经济效益。由于各种配水方案及水资源系统不确定性的影响,黑龙江省最终的水资源经济效益将在该区间内取得。

黑龙江省缺水主要集中在农业用水,与黑龙江省作为国家粮仓,为保障粮食安全大力发展农业密切相关,同时为实现粮食增产,有效灌溉面积的增加也进一步加大了农业需水。为应对农业缺水,管理者应调整作物种植结构,增加抗旱作物种植比例,同时提高灌溉效率,避免水资源浪费,实现水资源的高效利用。

3 结 论

- a. 根据区间多阶段随机规划模型所得黑龙江省 2025—2027 年不同来水情景下各水源的分配情况,确定系统经济效益最大的水资源分配方案。方案表明,在各种来水情景下生活、工业及生态用水均可以得到满足,农业用水在丰水年可以得到基本满足,平水年及枯水年水资源短缺问题开始凸显,最大缺水量达 59.52 亿 m³,管理者应通过调整作物结构,增加抗旱作物种植面积等措施,尽可能降低由缺水带来的经济损失。
- b. 黑龙江省规划年的水资源分配方案与现状年对比可知,生活、农业和生态用水呈现明显增长,工业用水呈下降趋势,农业缺水从 59.52 亿 m³下降到 49.40 亿 m³,地表水源供水比例稳步上升,有利于缓解地下水位下降问题,实现水资源可持续利用。
- c. 该模型能够较好地处理不确定条件下多水源、多用户的水资源配置问题,可以很好地调节水资源配置中的动态问题,平衡供水目标、水资源系统风险及系统经济效益三者之间的关系,实现各水源合理开发、水资源高效利用的目的。

参考文献:

[1] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002(3):262-269. (XIA Jun,ZHU Yizhong. The measurement of water resources security:a study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources,2002(3):262-269. (in Chinese))

[2] FRANCO S. Adaptation strategies for water resources: criteria for research[J]. Water,2017,9(10):805-814.

[3] 徐翔宇,酆建强,金菊良,等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang,et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):1-9. (in Chinese))

[4] 龚艳冰. 基于正态云组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. 水资源保护,2022,38(2):56-61. (GONG Yanbing. Comprehensive evaluation method of water resource allocation schemes based on normal cloud combination weighting[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):56-61. (in Chinese))

[5] 田进宽,郭佳航,左其亭,等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. 水资源保护,2022,38(2):62-67. (TIAN Jinkuan, GUO Jiahang, ZUO Qiting, et al. Thoughts and calculation model for water resources allocation in Shaying River Basin [J]. Water Resources Protection,

2022,38(2):62-67. (in Chinese))

[6] 贺北方,周丽,马细霞,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学,2002(3):10-12. (HE Beifang, ZHOU Li, MA Xixia, et al. Optimal allocation model of regional water resources based on genetic algorithm[J]. Water Resources and Power,2002(3):10-12. (in Chinese))

[7] 邵东国,贺新春,黄显峰,等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报,2005,36(9):1050-1056. (SHAO Dongguo, HE Xinchun, HUANG Xianfeng,et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(9):1050-1056. (in Chinese))

[8] 黄显峰,邵东国,顾文权,等. 基于多目标混沌优化算法的水资源配置研究[J]. 水利学报,2008,39(2):183-188. (HUANG Xianfeng, SHAO Dongguo, GU Wenquan, et al. Optimal water resources deployment based on multi-objective chaotic optimization algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (2): 183-188. (in Chinese))

[9] 杜佰林,张建丰,高泽海,等. 基于模拟退火粒子群算法的水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(3):292-299. (DU Bailin,ZHANG Jianfeng,GAO Zehai, et al. Optimal allocation of water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2021, 39 (3): 292-299. (in Chinese))

[10] 岳琼,郭萍,王友芝,等. 基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J]. 农业机械学报,2019,50(4):228-235. (YUE Qiong, GUO Ping, WANG Youzhi, et al. Optimal water allocation of irrigation district based on interval-parameter two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (4): 228-235. (in Chinese))

[11] MAQSOOD I, HUANG G H, HUANG Y F, et al. ITOM: an interval parameter two-stage optimization model for stochastic planning of water resources systems [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assess, 2005,19(2):125-133.

[12] PARSINEJAD M, YAZDI A B, ARAGHINEJAD S, et al. Optimal water allocation in irrigation networks based on real time climatic data [J]. Agricultural Water Management,2013,117:1-8.

[13] 姜秋香,曹璐,王子龙,等. 基于 CVaR-TSP 的黑龙江城市水资源配置及风险管理[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):40-46. (JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, et al. Urban water resources allocation and risk management based on CVaR-TSP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (1):40-46. (in Chinese))

[14] HUANG G H, LOUCKS D P. An inexact two-stage

- stochastic programming model for water resources management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems,2000,17:95-118.
- [15] 付强,刘银凤,刘东,等.基于区间多阶段随机规划模型的灌区多水源优化配置[J].农业工程学报,2016,32(1):132-139. (FU Qiang, LIU Yinfeng, LIU Dong, et al. Optimal allocation of multi-water resources in irrigation area based on interval-parameter multi-stage stochastic programming model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (1) : 132-139. (in Chinese))
- [16] SHABBIR A, ALANJ K, GYANA P. A multi-stage stochastic integer programming approach for capacity expansion under uncertainty [J]. Journal of Global Optimization,2003,26:3-24.
- [17] LI Y P, HUANG G H, HUANG Y F, et al. A multi-stage fuzzy-stochastic programming model for supporting sustainable water resources allocation and management [J]. Environmental Modelling & Software,2009,24:786-797.
- [18] DAI Z Y, LI Y P. A multistage irrigation. water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty [J]. Agricultural Water Management,2013,129:69-79.
- [19] 莫淑红,段海妮,沈冰,等.考虑不确定性的区间多阶段随机规划模型研究[J].水利学报,2014,45(12):1427-1434. (MO Shuhong, DUAN Haini, SHEN Bing, et al. Study on an interval multi-stage stochastic programming approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(12):1427-1434. (in Chinese))
- [20] 娄帅,王慧敏,牛文娟,等.基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究[J].资源科学,2013,35(3):569-577. (LOU Shuai, WANG Huimin, NIU Wenjuan, et al. Optimization of multi-stage group decision making for water resource allocation [J]. Resources Science,2013,35(3):569-577. (in Chinese))
- [21] 张鸿.基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及其应用[D].邯郸:河北工程大学,2019
- [22] LI Y P, HUANG G H, NIE S L. An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty [J]. Advances in Water Resources,2006,29(5):776-789.
- [23] YIN Libo, HAN Liyan. Options strategies for international portfolios with overall risk management via multi-stage stochastic programming [J]. Annals of Operations Research,2013,206(1):557-576.
- [24] STEPHAN H A, TIMO G, STEFAN M. Manufacturing capacity planning and the value of multi-stage stochastic programming under Markovian demand [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal,2010,22(3/4):143-162.
- [25] MICHAELS F, STEPHAN N, DIETMER L. Optimization of power plant investments under uncertain renewable energy deployment paths: a multistage stochastic programming approach[J]. Energy Systems,2014,5(1):85-121.
- [26] 姜秋香,王天,王子龙,等.基于EBM的水资源失衡风险导致的社会经济损失模型及应用[J].农业工程学报,2018,34(19):104-113. (JIANG Qiuxiang, WANG Tian, WANG Zilong, et al. EBM-based social economic loss model of water resources imbalance risk and its application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (19) : 104-113. (in Chinese))
- [27] LIU D, LIU W, FU Q, et al. Two-stage multi-water sources allocation model in regional water resources management under uncertainty [J]. Water Resources Management, 2017,31(11):3607-3625.
- [28] 姜秋香,吴云星,王子龙,等.黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析[J].水资源保护,2022,38(5):122-131. (JIANG Qiuxiang, WU Yunxing, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5) : 122-131. (in Chinese))
- [29] 刘巍,李雨晴,付强,等.黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析[J].农业机械学报,2020,51(8):214-222. (LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distributions of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (8) : 214-222. (in Chinese))
- [30] 陈红光,李晓宁,李晨洋.基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价:以黑龙江省2007—2016年水资源情况为例[J].生态经济,2021,37(1):179-184. (CHEN Hongguang, LI Xiaoning, LI Chenyang. Resilience evaluation of water resource system based on coefficients of variation entropy weight method: a case study of water resources in Heilongjiang Province from 2007 to 2016 [J]. Ecological Economy, 2021, 37 (1) : 179-184. (in Chinese))
- [31] 金菊良,刘东平,周戎星,等.基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J].水资源保护,2021,37(3):1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3) : 1-6. (in Chinese))
- [32] 黑龙江统计局.黑龙江统计年鉴2018[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [33] 中国水利部.中国水资源公报(2018)[M].北京:水利水电出版社,2019.
- [34] 黑龙江统计局.黑龙江年鉴2018[M].哈尔滨:《黑龙江年鉴》编辑部,2019.
- [35] 汪林,甘泓,倪红珍,等.水经济价值及相关政策影响分析[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

(收稿日期:2021-11-15 编辑:刘晓艳)