

基于 CVaR-TSP 的黑龙Ⓐ城市水资源配置及风险管理

姜秋香,曹璐,王子龙,王天,赵蚰竹,李鑫莹,何晓龙

(东北农业大学水利与土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:采用区间两阶段随机规划模型对不同来水水平、不同风险偏好的黑龙江省各城市进行水资源优化配置,解决了水资源系统中资源优化分配和不确定性等问题,利用条件风险价值衡量水资源系统中存在的风险,从而在规避风险的同时使得经济收益最大化。结果表明:不考虑风险偏好时,低、中、高来水情景下黑龙江经济总收益分别为5 245.35亿~7 933.32亿元、8 616.64亿~9 625.80亿元和1 530.50亿元;风险偏好为0.1~0.9时,各城市三次产业的分配水量随着风险偏好的增加而减少,管理者可根据不同产业厌恶风险的程度来选择适合的配置水量方案。

关键词:水资源;TSP模型;不确定性;CVaR模型;水资源管理

中图分类号:TV21 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)01-0040-07

Urban water resources allocation and risk management in Heilongjiang Province based on CVaR-TSP//JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, WANG Tian, ZHAO Youzhu, LI Xinying, HE Xiaolong(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Two-stage Stochastic Programming (TSP) was used to optimize the allocation of water resources between cities in Heilongjiang Province with different inflow and risk levels, and the problems of optimal allocation and uncertainty in water resources system were solved. Conditional value at risk (CVaR) was used to measure the risks in water resources system to avoid the risks and maximize the economic benefits. When risk preference is not taken into account, the total revenue of Heilongjiang under the low, medium and high scenarios are (524.535 ~ 793.332) billion yuan, (861.664 ~ 962.580) billion yuan and 153.050 billion yuan respectively. When the risk preference value is from 0.1 to 0.9, the amount of water allocated by each city's tertiary industries decreases with the increase of risk preference, and the administrators can choose appropriate water allocation schemes according to the degree of risk aversion of different industries. This study provides references for scientific allocation of urban water resources management.

Key words: water resources; TSP model; uncertainty; CVaR model; water resources management

近年来,由于气候变化和干旱灾害等因素的影响,导致部分地区需水与水资源供给能力之间的矛盾日益加剧,造成水资源系统风险增大,严重威胁了经济社会的发展^[1]。为保证水资源供需平衡,需对水资源进行合理分配^[2]。但在水资源优化配置过程中有很多不确定性因素,如降雨在时空上的随机不确定性、不同时期用户需求的不确定性以及管理者供水的不确定性等^[3]。国内外学者对不确定性情况下合理分配水资源问题进行了大量研究^[4-7]。

两阶段随机规划是一个在随机事件发生后采取纠正措施的追索过程,当第一阶段制定初始分配目标后,第二阶段进行追索行动,以纠正任何不可行性^[8]。区间两阶段随机规划模型(TSP模型)采用

区间的形式表示参数的不确定性,可以有效地将不确定性传递到最优框架中,从而简化子模型和减少计算量^[9]。因此,国内外学者开始应用TSP模型解决水资源管理中存在的不确定性问题。Huang等^[10]将不精确优化概念引入两阶段随机规划框架中,以此反映概率分布和离散区间表示的不确定性,并利用假设案例验证了模型的合理性。Maqsood等^[11]在区域水资源管理的案例研究中验证了区间参数模糊两阶段随机规划方法可有效地产生解决方案这一结论。付银环等^[12]建立了区间两阶段随机规划模型,有效解决了该区域灌区水资源系统的不确定性问题,为管理者提供了不同地区地下水和地表水的合理分配方案,为农业水资源管理提供重要

基金项目:国家自然科学基金(51679040,42071243);黑龙江省科学基金(YQ2020E001)

作者简介:姜秋香(1982—),女,副教授,博士,主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail:jiangqiuxiang2017@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

参考。

由于 TSP 模型的目标函数是收益最大化,大部分决策者会将水资源优先分配给经济效益高的用户,这样会直接影响其他用户的用水量,导致水资源分配的不公平^[13]。此外,当经济效益高的用户供水量达不到其需水量时会面临较高的经济损失。条件风险价值(CVaR)是为了克服风险价值模型尾部测量非充分性的缺陷而提出的一种新的风险测量模型,表示在一定置信水平上损失超过期望损失最小值的条件均值^[14-18]。CVaR 模型能够真实地反映水资源分配中产生的风险大小,可将无形的风险转换为定量的经济损失,进而得到不同风险偏好下的水资源分配方案和经济收益,为城市水资源配置提供决策方案^[19-20]。因此,本文以黑龙江省 13 个城市为研究对象,利用 CVaR-TSP 模型进行城市水资源的合理分配,制定不同风险偏好下的水资源配置方案,为城市水资源合理利用和风险规避提供政策支持。

1 研究方法

1.1 基于 CVaR-TSP 的水资源优化配置模型

本文针对黑龙江省 13 个城市水资源系统存在的不确定性,建立 TSP 模型:第一阶段研究用户得到用水满足时的收益,第二阶段研究当供水量达不到各用户用水需求时缺水导致的经济损失。通过两个阶段的相互过程,并根据水资源系统中存在的风险,将 CVaR 模型与 TSP 模型进行耦合,建立基于 CVaR-TSP 的水资源优化模型。

CVaR 模型可表述为^[21-24]

$$c = \max \{E[f(x, \omega)] - \lambda \rho(Q(x, \xi(\omega)))\} \quad (1)$$

式中: c 为 CVaR 模型的目标函数; x 为决策变量; $f(x, \omega)$ 为目标函数; $E(f(x, \omega))$ 为目标函数的期望值; λ 为风险偏好,通过调节 λ 可实现收益与风险之间的权衡, $\lambda = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9$; $\rho(\cdot)$ 为风险度量模型; $Q(\cdot)$ 为连续损失函数; $\xi(\omega)$ 为随机函数; ω 为随机变量。

随机变量在置信水平 $\alpha (\alpha \in [0, 1])$ 上的风险度量模型可以定义如下:

$$\rho = \eta + \frac{1}{1 - \alpha} E(P_j v_j^+) \quad (2)$$

式中: η 为给定置信水平下系统的最大损失; α 为置信区间; P_j 为场景 j 发生的概率($j = 1, 2, 3$), P_1 、 P_2 、 P_3 分别代表低、中和高 3 种来水情景; v_j^+ 为场景 j 下的正辅助变量。

对于不同的用户,供水部门一般会根据每个用户产生的经济收益大小来供水,这样会导致水资源的不公平分配,引发供水矛盾^[25]。因此,结合 TSP

模型和 CVaR 模型,建立 CVaR-TSP 模型,公式为

$$\max f^+ = \sum_{i=1}^I N_i^+ W_i^+ - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_j C_i^+ D_{ij}^+ - \lambda \left(\eta + \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{j=1}^J P_j v_j^+ \right) \quad (3)$$

可用水量约束、需水量约束、技术约束和非负约束分别为

$$\begin{aligned} \sum_i (W_i^+ - D_{ij}^+) &\leq Q_j^+ \\ W_{i\max}^+ &\geq W_i^+ \geq W_{i\min}^+ \\ v_j^+ &\geq \sum_{i=1}^I C_i^+ D_{ij}^+ - \eta \\ D_{ij}^+ &\geq 0 \quad \eta \geq 0 \end{aligned}$$

式中: f^+ 为系统净效益; N_i^+ 为分配给需水用户 i 每单位用水产生的净效益,即单方水经济收益; W_i^+ 为分配给用户 i 的供水目标; C_i^+ 为用户 i 未达到供水目标所产生的经济损失,即单方水经济损失; D_{ij}^+ 为用户 i 水资源供水目标低于实际分配水资源量,即缺水量; Q_j^+ 为第 j 情景下可利用总水量; $W_{i\max}^+$ 、 $W_{i\min}^+$ 分别为分配给用户 i 的最大和最小需水量目标; I 为用水户总数; J 为水资源情景总数。

1.2 CVaR-TSP 模型的求解

由于 W_i^+ 是不确定参数,导致无法求出模型的解,因此首先确定一个决策变量 $y_i (y_i \in [0, 1])$,令 $W_i^+ = W_i^- + \Delta W_i y_i$,其中 ΔW_i 为供水目标上限 W_i^+ 与供水目标下限 W_i^- 之差,即 $\Delta W_i = W_i^+ - W_i^-$ 。由此将 CVaR-TSP 模型转化为由上限子模型和下限子模型组成的两个确定模型。

由于 CVaR-TSP 模型的最终目标为收益最大化,因此首先对上限子模型进行求解。上限子模型为

$$\begin{aligned} \max f^+ &= \sum_{i=1}^I N_i^+ (W_i^- + \Delta W_i y_i) - \\ &\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_j C_i^- D_{ij}^- - \lambda \left(\eta + \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{j=1}^J P_j v_j^- \right) \quad (4) \end{aligned}$$

可用水量约束、需水量约束、技术约束和非负约束分别如下:

$$\begin{aligned} \sum_i (W_i^- + \Delta W_i y_i - D_{ij}^-) &\leq Q_j^+ \\ W_{i\max}^+ &\geq W_i^- + \Delta W_i y_i \geq W_{i\min}^+ \\ v_j^- &\geq \sum_{i=1}^I C_i^- D_{ij}^- - \eta \\ D_{ij}^- &\geq 0 \quad \eta \geq 0 \end{aligned}$$

式中: f^+ 为系统净效益上限; N_i^+ 为分配给需水用户 i 每单位用水产生的净效益上限; C_i^- 为用户 i 未达到供水目标所产生的经济损失下限; D_{ij}^- 为缺水量下

限; Q_j^+ 为第 j 情景下可利用总水量上限; v_j^- 为辅助变量下限; W_{imax}^+ 、 W_{imin}^+ 分别为最大需水量目标上限和最小需水量目标上限。

下限子模型为

$$\begin{aligned} \max f^- = & \sum_{i=1}^I N_i^-(W_i^- + \Delta W y_i) - \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_j C_i^+ D_{ij}^+ - \lambda \left(\eta + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{j=1}^J P_j v_j^+ \right) \end{aligned} \quad (5)$$

可用水量约束、需水量约束、技术约束和非负约束分别为

$$\begin{aligned} \sum_i (W_i^- + \Delta W y_i - D_{ij}^+) & \leq Q_j^- \\ W_{imax}^- & \geq W_i^- + \Delta W y_i \geq W_{imin}^- \\ v_j^+ & \geq \sum_{i=1}^I C_i^+ D_{ij}^+ - \eta \\ D_{ij}^+ & \geq 0 \quad \eta \geq 0 \end{aligned}$$

式中: f^- 为系统净效益下限; N_i^- 为分配给需水用户 i 每单位用水产生的净效益下限; C_i^+ 为用户 i 未达到供水目标所产生的经济损失上限; D_{ij}^+ 为缺水量上限; Q_j^- 为第 j 情景下可利用总水量下限; v_j^+ 为辅助量上限; W_{imax}^- 、 W_{imin}^- 分别为最大需水量目标下限和最小需水量目标下限。

结合上述两个子模型可以得到缺水量的最优解 $D_{ij}^* = [D_{ij}^-, D_{ij}^+]$, 以及经济收益的最优解 $f^* = [f^-, f^+]$, 进而确定最优配置水量 $T_{ij}^* = [W_i^- - D_{ij}^+, W_i^+ - D_{ij}^-]$ 。

2 研究区域概况及数据来源

黑龙江省位于我国东北部,总土地资源面积为 47.3 万 km², 其中,农业用地所占面积比例最大,为 83.5%。由于黑龙江省是农业大省,第一产业用水较多且逐年递增,第二和第三产业用水量逐年递减,导致水资源存在分配不平衡问题^[26]。因此本文对黑龙江省 13 个城市(哈尔滨、大庆、大兴安岭、鹤岗、黑河、鸡西、佳木斯、牡丹江、七台河、齐齐哈尔、双鸭山、绥化和伊春)进行水资源的合理配置,以降低风险水平,保障各城市社会经济可持续发展。

表 1 给出了 13 个城市三次产业的最大和最小分配水量、单方水经济收益和损失,其中,单方水经济收益和损失依据黑龙江省各产业增加值和供水量确定^[27-28]。由于不同城市的不同产业供水优先次序不同,根据不同城市不同产业的实际分配水量^[28],确定 TSP 模型的最大和最小分配水量约束。

3 结果与分析

本文将 CVaR-TSP 模型应用到黑龙江省各城市的水资源优化配置中,根据不同城市的最优供水目

表 1 不同城市三次产业最大、最小分配水量和
单方水经济收益、损失

城市	用户	最优供水目标/ 亿 m ³	单方水经济收益/元	单方水经济损失/元	最大分配水量/ 亿 m ³	最小分配水量/ 亿 m ³
哈尔滨	第一产业	69.63	10.81	11.90	82.12	59.91
	第二产业	4.17	347.88	389.63	4.79	3.46
	第三产业	5.93	552.70	657.27	6.02	3.72
大庆	第一产业	23.00	10.07	11.07	27.13	19.79
	第二产业	4.70	403.23	451.61	5.40	3.89
	第三产业	2.24	361.40	429.77	2.27	1.40
大兴安岭	第一产业	0.02	1203.43	1323.77	0.03	0.02
	第二产业	0.01	549.15	615.05	0.01	0.01
	第三产业	0.12	386.88	460.07	0.12	0.08
鹤岗	第一产业	23.80	4.55	5.00	28.07	20.48
	第二产业	0.57	134.80	150.98	0.65	0.47
	第三产业	0.39	186.17	221.39	0.40	0.25
黑河	第一产业	3.39	63.66	70.03	4.00	2.92
	第二产业	0.29	174.11	195.00	0.33	0.24
	第三产业	0.50	267.27	317.84	0.50	0.31
鸡西	第一产业	43.07	4.93	5.42	50.80	37.06
	第二产业	0.62	208.74	233.79	0.71	0.51
	第三产业	0.71	242.28	288.12	0.72	0.45
佳木斯	第一产业	84.98	4.16	4.58	100.22	73.11
	第二产业	2.13	73.23	82.02	2.45	1.77
	第三产业	1.17	319.38	379.80	1.19	0.73
牡丹江	第一产业	9.32	26.99	29.69	10.99	8.02
	第二产业	1.69	231.04	258.76	1.94	1.40
	第三产业	1.15	546.60	650.01	1.17	0.72
七台河	第一产业	2.66	14.05	15.45	3.14	2.29
	第二产业	0.46	202.14	226.40	0.53	0.38
	第三产业	0.36	242.08	287.88	0.36	0.22
齐齐哈尔	第一产业	48.01	7.55	8.31	56.62	41.30
	第二产业	7.74	49.79	55.76	8.89	6.41
	第三产业	1.85	270.86	322.11	1.88	1.16
双鸭山	第一产业	27.65	7.48	8.23	32.61	23.79
	第二产业	0.59	163.49	183.11	0.68	0.49
	第三产业	0.68	200.55	238.49	0.69	0.42
绥化	第一产业	33.31	17.89	19.68	39.28	28.66
	第二产业	0.47	650.20	728.22	0.54	0.39
	第三产业	1.71	260.08	309.28	1.73	1.07
伊春	第一产业	5.17	23.24	25.56	6.10	4.45
	第二产业	0.35	113.12	126.69	0.41	0.29
	第三产业	0.44	173.80	206.68	0.44	0.27

标(即 W_i^+),结合公式(4)和式(5)计算得出各城市不同产业的缺水量以及经济收益,获得水资源优化配置的最优解,管理者可以根据区间范围给各用户进行配水,从而得到满意的配水方案。通过查阅《黑龙江省统计年鉴》^[27]的降雨数据,并结合黑龙江省水文特征, P_1 、 P_2 、 P_3 分别采用 0.5、0.75 和 0.95 这 3 种来水概率。

3.1 模型精度分析

将 2014 年、2016 年和 2017 年黑龙江省地区生产总值和模型计算的经济收益进行模型精度分析。根据《黑龙江省水资源公报》^[28],2014 年、2016 年和 2017 年属于高来水水平,将黑龙江省这 3 年实际生

产总值(分别为 15 132. 20 亿元、15 386. 10 亿元、15 902. 70 亿元)和模型中的计算结果(这 3 年均均为 15 305. 00 亿元)进行比较,其相对误差均在 5% 以内,验证了该模型的可靠性。

3.2 不考虑风险偏好的水资源配置

为了更好地呈现水资源分配方案,首先计算风险偏好为 0 时不同城市三次产业各情景下的最优配置水量和缺水量,结果见表 2 和表 3。

由表 2 和表 3 可知,随着来水量的增加,黑龙江省各城市水资源分配量逐渐增加,缺水量减少,同时水资源在不同产业的分配比例也有所改变。鹤岗、牡丹江和七台河在 P_2 情景下的第二产业配水低于第三产业,但在 P_3 情景下却高于第三产业配水。由此说明在水资源分配过程中,水量不足时会优先满足第一和第三产业配水,最后考虑第二产业;只有在供水充足的情况下,第二产业才能得到充分满足。这是由于黑龙江省是农业大省,在水资源分配过程中会保证第一产业的用水;此外,第三产业单方水经济收益较高,同时需水远远小于第一产业,因此水资

源会优先分配给第一、第三产业,最后分配给第二产业,但这样分配存在弊端。如大庆的第二产业为主导产业,配水量无法满足需求时将导致支柱产业逐步缩水,致使经济受到影响。

根据不同产业配水量和单方水经济收益,确定不同情景下各城市三次产业经济收益(表 4)。由此得知,黑龙江省经济总收益在 P_1 、 P_2 、 P_3 情景下分别为 5 245. 35 亿 ~ 7 933. 32 亿元、8 616. 64 亿 ~ 9 625. 80 亿元和 15 305. 00 亿元。黑龙江为农业大省,第一产业较为发达,应最大程度地满足第一产业的用水需求。第二产业在 P_1 情景下的配水量较少,缺水量很大,所以经济损失较大,导致第二产业经济收益与第一、第三产业相比非常低。在 P_2 情景下,各城市第二产业的经济收益有所增加。在 P_3 情景下,第二产业分配水量达到供水目标,缺水量为 0,没有经济损失,使得经济收益达到最大。因此,水资源分配不公平会造成第二产业分配水量的减少,从而造成经济损失,使得第二产业经济收益减少。在 P_3 情景下,水资源充足,没有经济损失,经济收益达

表 2 不同情景下风险偏好为 0 时各城市三次产业的最优配置水量 单位:亿 m³

城市	P_1 情景最优配置水量			P_2 情景最优配置水量			P_3 情景最优配置水量		
	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业
哈尔滨	50. 97 ~ 57. 25	2. 69 ~ 2. 85	4. 54 ~ 5. 15	59. 66 ~ 62. 29	2. 89 ~ 2. 95	5. 29 ~ 5. 52	69. 63	4. 17	5. 93
大 庆	16. 86 ~ 19. 1	2. 51 ~ 2. 74	1. 72 ~ 1. 94	19. 6 ~ 20. 56	2. 80 ~ 2. 88	2. 00 ~ 2. 08	23. 00	4. 70	2. 24
大兴安岭	0. 017 ~ 0. 02	0. 006 ~ 0. 007	0. 09 ~ 0. 11	0. 02 ~ 0. 021	0. 006 ~ 0. 007	0. 109 ~ 0. 113	0. 02	0. 01	0. 12
鹤 岗	17. 45 ~ 19. 77	0. 3 ~ 0. 33	0. 3 ~ 0. 34	20. 28 ~ 21. 28	0. 34 ~ 0. 35	0. 35 ~ 0. 37	23. 80	0. 57	0. 39
黑 河	2. 48 ~ 2. 81	0. 15 ~ 0. 17	0. 38 ~ 0. 43	2. 89 ~ 3. 03	0. 17 ~ 0. 18	0. 44 ~ 0. 46	3. 39	0. 29	0. 50
鸡 西	31. 57 ~ 35. 76	0. 33 ~ 0. 36	0. 55 ~ 0. 62	36. 7 ~ 38. 51	0. 37 ~ 0. 38	0. 64 ~ 0. 66	43. 07	0. 62	0. 71
佳木斯	62. 28 ~ 70. 56	1. 14 ~ 1. 24	0. 90 ~ 1. 02	72. 4 ~ 75. 97	1. 27 ~ 1. 31	1. 05 ~ 1. 09	84. 98	2. 13	1. 17
牡丹江	6. 83 ~ 7. 74	0. 9 ~ 0. 99	0. 88 ~ 1. 00	7. 94 ~ 8. 33	1. 01 ~ 1. 04	1. 03 ~ 1. 07	9. 32	1. 69	1. 15
七台河	1. 95 ~ 2. 21	0. 25 ~ 0. 27	0. 27 ~ 0. 31	2. 27 ~ 2. 38	0. 27 ~ 0. 28	0. 32 ~ 0. 33	2. 66	0. 46	0. 36
齐齐哈尔	35. 18 ~ 39. 86	4. 13 ~ 4. 51	1. 42 ~ 1. 61	40. 9 ~ 42. 92	4. 62 ~ 4. 74	1. 65 ~ 1. 72	48. 01	7. 74	1. 85
双鸭山	20. 26 ~ 22. 96	0. 31 ~ 0. 34	0. 52 ~ 0. 59	23. 56 ~ 24. 72	0. 35 ~ 0. 36	0. 61 ~ 0. 63	27. 65	0. 59	0. 68
绥 化	24. 41 ~ 27. 65	0. 25 ~ 0. 27	1. 32 ~ 1. 49	28. 38 ~ 29. 78	0. 28 ~ 0. 29	1. 53 ~ 1. 59	33. 31	0. 47	1. 71
伊 春	3. 79 ~ 4. 29	0. 19 ~ 0. 21	0. 34 ~ 0. 38	4. 40 ~ 4. 62	0. 21 ~ 0. 22	0. 39 ~ 0. 41	5. 17	0. 35	0. 44

表 3 不同情景下风险偏好为 0 时各城市三次产业的缺水量 亿 m³

城市	P_1 情景缺水量			P_2 情景缺水量		
	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业
哈尔滨	12. 38 ~ 18. 66	1. 32 ~ 1. 48	0. 78 ~ 1. 39	7. 34 ~ 9. 97	1. 22 ~ 1. 28	0. 41 ~ 0. 64
大庆	3. 90 ~ 6. 14	1. 96 ~ 2. 19	0. 29 ~ 0. 51	2. 44 ~ 3. 40	1. 82 ~ 1. 89	0. 16 ~ 0. 23
大兴安岭	0. 004 ~ 0. 006	0. 004 ~ 0. 005	0. 02 ~ 0. 03	0. 003 ~ 0. 004	0. 004 ~ 0. 005	0. 008 ~ 0. 013
鹤 岗	4. 04 ~ 6. 36	0. 24 ~ 0. 27	0. 05 ~ 0. 09	2. 52 ~ 3. 52	0. 22 ~ 0. 23	0. 03 ~ 0. 04
黑 河	0. 57 ~ 0. 90	0. 12 ~ 0. 13	0. 06 ~ 0. 11	0. 36 ~ 0. 50	0. 11 ~ 0. 12	0. 03 ~ 0. 05
鸡 西	7. 31 ~ 11. 50	0. 26 ~ 0. 29	0. 09 ~ 0. 16	4. 57 ~ 6. 37	0. 24 ~ 0. 25	0. 05 ~ 0. 07
佳木斯	14. 42 ~ 22. 7	0. 89 ~ 0. 99	0. 15 ~ 0. 27	9. 01 ~ 12. 57	0. 83 ~ 0. 86	0. 08 ~ 0. 12
牡丹江	1. 58 ~ 2. 49	0. 71 ~ 0. 79	0. 15 ~ 0. 26	0. 99 ~ 1. 38	0. 66 ~ 0. 68	0. 08 ~ 0. 12
七台河	0. 45 ~ 0. 71	0. 19 ~ 0. 22	0. 05 ~ 0. 08	0. 28 ~ 0. 39	0. 18 ~ 0. 19	0. 02 ~ 0. 04
齐齐哈尔	8. 15 ~ 12. 82	3. 23 ~ 3. 61	0. 24 ~ 0. 43	5. 09 ~ 7. 10	3. 00 ~ 3. 12	0. 13 ~ 0. 19
双鸭山	4. 69 ~ 7. 39	0. 25 ~ 0. 27	0. 09 ~ 0. 16	2. 93 ~ 4. 09	0. 23 ~ 0. 24	0. 05 ~ 0. 07
绥 化	5. 65 ~ 8. 90	0. 2 ~ 0. 22	0. 22 ~ 0. 39	3. 53 ~ 4. 93	0. 18 ~ 0. 19	0. 12 ~ 0. 18
伊 春	0. 88 ~ 1. 38	0. 15 ~ 0. 17	0. 06 ~ 0. 10	0. 55 ~ 0. 76	0. 13 ~ 0. 14	0. 03 ~ 0. 05

表4 不同城市在 P_1 、 P_2 和 P_3 情景下三次产业经济收益

单位:亿元

城市	P_1 情景经济收益			P_2 情景经济收益			P_3 情景经济收益		
	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业
哈尔滨	328.9 ~ 471.5	360.4 ~ 477.7	1 592.8 ~ 2 328.8	526.2 ~ 586.1	505.3 ~ 548.5	2 500.5 ~ 2 779.7	752.7	1 450.7	3 276.8
大庆	101.7 ~ 149.1	22.0 ~ 219.8	400.8 ~ 576.5	159.6 ~ 180.0	274.9 ~ 338.6	622.9 ~ 684.4	231.6	1 893.3	807.9
大兴安岭	12.5 ~ 18.4	0.1 ~ 0.7	23.3 ~ 33.5	19.7 ~ 22.2	0.9 ~ 1.1	36.2 ~ 39.8	28.6	6.3	47.0
鹤岗	47.5 ~ 69.7	0.9 ~ 8.9	36.4 ~ 52.4	74.6 ~ 84.1	11.1 ~ 13.7	56.6 ~ 62.2	108.2	76.7	73.4
黑河	94.7 ~ 138.8	0.6 ~ 5.8	65.9 ~ 94.7	148.7 ~ 167.7	7.3 ~ 9.0	102.3 ~ 112.5	215.7	50.1	132.7
鸡西	93.2 ~ 136.7	1.5 ~ 14.9	85.5 ~ 122.9	146.3 ~ 165.1	18.7 ~ 23.0	132.8 ~ 146.0	212.3	128.5	172.3
佳木斯	155.2 ~ 227.6	1.8 ~ 18.1	185.1 ~ 266.2	243.7 ~ 274.9	22.7 ~ 27.9	287.6 ~ 316.0	353.5	156.0	373.1
牡丹江	110.4 ~ 161.9	4.6 ~ 45.4	311.5 ~ 448.1	173.3 ~ 195.5	56.7 ~ 69.9	484.1 ~ 532.0	251.5	390.7	628.0
七台河	16.4 ~ 24.1	1.1 ~ 10.9	42.8 ~ 61.6	25.8 ~ 29.1	13.6 ~ 16.8	66.5 ~ 73.1	37.4	93.9	86.3
齐齐哈尔	159.2 ~ 233.3	4.5 ~ 44.7	248.3 ~ 357.1	249.9 ~ 281.8	55.9 ~ 68.9	385.9 ~ 424.0	362.5	385.1	500.5
双鸭山	90.8 ~ 133.1	1.1 ~ 11.2	67.4 ~ 96.9	142.5 ~ 160.8	14.00 ~ 17.2	104.7 ~ 115.1	206.8	96.3	135.9
绥化	261.6 ~ 383.5	3.6 ~ 35.6	220.5 ~ 317.1	410.7 ~ 463.2	44.5 ~ 54.8	342.6 ~ 376.5	595.8	306.6	444.4
伊春	52.8 ~ 77.3	0.5 ~ 4.7	37.7 ~ 54.2	82.8 ~ 93.4	5.8 ~ 7.2	58.6 ~ 64.4	120.1	40.1	76.0

到最大,但在该情景下可能会出现水资源浪费的现象。

综上所述,TSP 模型在配水过程中 P_1 情景会优先考虑第一、第三产业,最后考虑第二产业,使得第二产业经济损失过大,造成分配不公平的风险,此时黑龙江省经济损失达到 3 917.86 亿 ~ 5 357.05 亿元。此外在 P_3 情景下,会造成水资源浪费的风险。由此本文在 TSP 模型中引入风险偏好,实现规避风险的同时保障水资源的公平分配。

3.3 考虑风险偏好的水资源配置

不考虑风险偏好的水资源配置以水资源系统收益最大化为目标,忽略了用户之间的公平性,使得黑龙江省第二产业遭受了较大的经济损失,同时造成水资源的浪费^[29-31]。因此,采用 CVaR-TSP 模型确定不同情景和不同风险偏好的黑龙江省三次产业配水。

结果表明,黑龙江省第二产业分配水量受来水和风险偏好影响较大。当来水较少时(P_1 情景), $\lambda=0.1 \sim 0.9$ 的第二产业分配水量与不考虑风险偏好时无明显增加。当来水增多时(P_2 情景),水资源系统会增加第二产业的分配水,此时 $\lambda=0.1、0.2、0.3$ 和 0.4 与 $\lambda=0$ 相比可分别增加配水 2.61 亿 ~ 2.66 亿 m^3 、1.62 亿 ~ 2.09 亿 m^3 、0.61 亿 ~ 0.75 亿 m^3 和 0.02 亿 ~ 0.27 亿 m^3 ,从而降低了第二产业的经济损失,缓解了三次产业间的用水矛盾。在 P_3 情景下,三次产业水资源分配量随着风险偏好的增加而减少,从而可以节省水资源,避免浪费。当 $\lambda=0$ 即不考虑风险时,黑龙江省配水为最优供水目标;当 $\lambda=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5$ 和 $0.6 \sim 0.9$ 时,与 $\lambda=0$ 时的最优配水相比可分别节省水资源量 0 ~ 23.86 亿 m^3 、23.87 亿 ~ 34.29 亿 m^3 、30.23 亿 ~ 34.09 亿 m^3 、31.02 亿 ~ 35.32 亿 m^3 、32.82 亿 ~ 36.53 亿 m^3 和 33.69 亿 ~ 37.71 亿 m^3 ,即考虑风险可以降低配水量,避免在供水充足时产生水资源浪

费。在黑龙江省三次产业中,第一产业节省的水资源最多,节水最多时可达第一产业最优供水目标的 8%,节水效果最明显。这是由于第一产业会根据来水判断作物需水情况,如果雨水丰富,则浇灌农田用水减少,需水量降低,从而减少第一产业水资源分配量,达到农业节水的效果。

不同情景下第一产业经济收益在 $\lambda=0.1 \sim 0.9$ 时减少较缓慢;第二、第三产业的经济收益在 P_1 和 P_2 情景下随着 λ 的增加急剧减小,而在 P_3 情景下经济收益减小速度降低。总体来说,这是由于第一产业单方水经济收益和经济损失较低,降低分配水量和提高风险偏好对总体经济收益影响较小;而第二、第三产业单方水经济收益和损失普遍较高,降低分配水量会造成较大的经济损失,从而使经济收益急剧下降。随着风险偏好的增加,水资源系统为了规避风险,会通过减少分配水量实现风险的降低,从而导致经济收益减少,但水量减少到一定程度后,水资源系统会满足其基本需求水量,此时经济收益趋于稳定。

4 结 论

a. 在 P_1 和 P_2 情景下,黑龙江省各城市都有不同程度的缺水现象,其中 P_1 情景下缺水量最大,经济损失达到 3 917.86 亿 ~ 5 357.05 亿元; P_3 情景下三次产业用水量基本得到满足,经济收益达到 15 305.00 亿元,但此时水资源存在浪费现象。

b. 不考虑风险偏好下,产业配水取决于区域经济发展特点,以农业为主的佳木斯虽然第一产业配水量最高,但产生的经济收益却较少。以第二产业为主导的大庆,配水量无法满足需求,致使支柱型产业经济受到影响。服务业较发达的哈尔滨,第三产业用水量较多的同时经济收益也更大。不考虑风险

偏好时,黑龙江省三次产业间配水呈现出分配不公平的特点。

c. 为了避免水资源浪费和实现产业间公平分配,引入 CVaR 模型,缓解了第二产业缺水量大的问题。 $\lambda=0.1 \sim 0.9$ 时,各城市三次产业的分配水量随着 λ 的增加而减少,管理者可根据不同产业厌恶风险的程度来选择适合的配置水量方案。

d. 随着 λ 的增加,各城市三次产业分配水量逐渐降低,经济收益相对减少。但水量减少到一定程度后,水资源系统会满足其基本需求水量,此时经济收益趋于稳定。

参考文献:

[1] 夏军,彭少明,王超,等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]. 人民黄河,2014,36(10):1-4. (XIA Jun, PENG Shaoming, WANG Chao, et al. Impact of climate change on water resources and adaptive management in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2014,36(10):1-4. (in Chinese))

[2] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等. 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践,2003,23(2):133-138. (FENG Yaolong, HAN Wenxiu, WANG Hongjiang, et al. Study on the sustainable development oriented optimal allocation to region water resources[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2003, 23(2): 133-138. (in Chinese))

[3] 韩雁,黄跃飞,王光谦,等. 基于区间不确定性水资源复杂系统的协调演化研究[J]. 水利学报,2011,42(8):892-898. (HAN Yan, HUANG Yuefei, WANG Guangqian, et al. Study on coordination evolvement of complex water resources system with interval uncertainty [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(8): 892-898. (in Chinese))

[4] 李东林,左其亭,马军霞. 基于不确定性双层规划的水资源配置及和谐评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):350-360. (LI Donglin, ZUO Qiting, MA Junxia. Water resources allocation and harmony evaluation-case of uncertain bi-level planning [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(3): 350-360. (in Chinese))

[5] 刘年磊,蒋洪强,吴文俊. 基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J]. 中国环境科学,2014,6(6):1607-1613. (LIU Nianlei, JIANG Hongqiang, WU Wenjun. Empirical research of optimal allocation model of water resources under uncertainties [J]. China Environmental Science, 2014, 6(6): 1607-1613. (in Chinese))

[6] 向龙,龚泓博. 基于 IFMOP 的玉环市区域水资源配置[J]. 水资源保护,2021,37(6):49-53. (XIANG Long,

GONG Hongbo. Regional water resources allocation in Yuhuan based on IFMOP [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 49-53. (in Chinese))

[7] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))

[8] LI C Y, ZHANG L. An inexact two-stage allocation model for water resources management under uncertainty [J]. Water Resources Management, 2015, 29(6): 1823-1841.

[9] 付强,李佳鸿,刘东,等. 考虑风险价值的不确定性水资源优化配置[J]. 农业工程学报,2016,32(7):136-144. (FU Qiang, LI Jiahong, LIU Dong, et al. Allocation optimization of water resources based on uncertainty stochastic programming model considering risk value[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 136-144. (in Chinese))

[10] 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(2): 95-118.

[11] MAQSOOD I, HUANG G H, YEOMANS J S. An interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(1): 208-225.

[12] 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 Yinhuan, GUO Ping, FANG Shiqi, 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))

[13] 陈红光,王中君,王琼雅,等. 基于区间两阶段-部分信息模型的城市水资源优化配置[J]. 资源科学,2019,41(8):1416-1426. (CHEN Hongguang, WANG Zhongjun, WANG Qiongya, et al. An interval-parameter two-stage partial information programming model for optimal urban water resource planning [J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1416-1426. (in Chinese))

[14] UHLIG H. The robustness of identified VAR conclusions about money: a comment [J]. Social Science Electronic Publishing, 2005, 49(1): 245-263.

[15] 周钱彬,吉余峰. 人民币国际化对货币错配的效应:基于 VAR 模型分析[J]. 时代金融,2019(6):111-113. (ZHOU Qianbin, JI Yufeng. The effect of RMB internationalization on currency mismatch: based on VAR model [J]. Times Finance, 2019(6): 111-113. (in Chinese))

- [16] 何琳洁,文凤华,马超群. 基于一致性风险价值的投资组合优化模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(2): 125-128. (HE Linjie, WEN Fenghua, MA Chaoqun. Portfolio optimization model of coherent value-at-risk[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2005, 32(2): 125-128. (in Chinese))
- [17] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 488-497. (WANG Hongrui, WEI Haoshan, HU Litang, et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 488-497. (in Chinese))
- [18] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 116-122. (HE Xinyue, ZENG Xiankui, WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 116-122. (in Chinese))
- [19] GUO X, CHAN R H, WONG W K, et al. Mean-variance, mean-VaR, and mean-CVaR models for portfolio selection with background risk [J]. Risk Management, 2019, 21(2): 73-98.
- [20] TANG L, LING A. A closed-form solution for robust portfolio selection with worst-case CVaR risk measure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(3): 1-9.
- [21] MAQSOOD I, HUANG G, HUANG Y, et al. ITOM: an interval-parameter two-stage optimization model for stochastic planning of water resources systems [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2005, 19(2): 125-133.
- [22] AGOURAM J, LAKHNATI G. A Comparative study of mean-variance and mean gini portfolio selection using VaR and CVaR [J]. Journal of Financial Risk Management, 2015, 4(2): 70-79.
- [23] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. Journal of Banking & Finance, 2002, 26(7): 1443-1471.
- [24] 郑继明,郑永杰,胡济桐,等. 均值-CVaR 投资组合模型的遗传算法求解研究[J]. 科技与创新, 2020(20): 12-14. (ZHENG Jiming, ZHENG Yongjie, HU Jitong, et al. Genetic algorithm for mean-CVaR portfolio selection model [J]. Science and Technology & Innovation, 2020(20): 12-14. (in Chinese))
- [25] ZHANG C, GUO P. An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement [J]. Ecological Indicators, 2017, 92: 342-353.
- [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] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [28] 黑龙江省水利厅. 黑龙江省水资源公报[R]. 哈尔滨: 黑龙江省水利厅, 2018.
- [29] 曹永强,李玲慧. 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[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 25-31. (CAO Yongqiang, LI Linghui. Simulation analysis of water resources in Beijing based on integrated comprehensive water simulation and allocation model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 25-31. (in Chinese))
- [30] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [31] 孟丽红,丁之勇,李成阳,等. 区域水资源代谢效率时空变化及驱动因素[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 20-26. (MENG Lihong, DING Zhiyong, LI Chengyang, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of regional water resources metabolism efficiency [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 20-26. (in Chinese))

(收稿日期:2020-12-17 编辑:骆超)

