

京津冀水资源与产业结构优化适配模型

吴丹¹, 向筱茜¹, 冀晨辉²

(1. 北方工业大学经济管理学院, 北京 100144; 2. 帝国理工学院, 英国伦敦 SW7 2AZ)

摘要:立足京津冀的具体区情与水情,强化水资源刚性约束,提出京津冀水资源与产业结构优化适配理念与适配框架;构建适配方案设计原则及其对应的目标函数,确定适配方案设计的约束条件,集成建立多目标优化配置模型;构造适配方案诊断准则,嵌入多目标优化配置模型,实现京津冀水资源统筹优化配置。结果表明:京津冀总体目标优化函数值达到0.99,验证了构建的适配框架和适配模型的可行性;2000—2019年北京-天津、北京-河北、天津-河北水资源配置利用与经济发展的相对适应度分别处于 $[0.80, 1.20]$ 、 $[0.80, 1.00]$ 、 $[0.70, 1.20]$ 区间,其中2019年北京-天津、北京-河北、天津-河北的水资源配置利用与经济发展的相对适应度分别为0.878、0.975、1.110,位于诊断阈值区间 $[0.8, 1.2]$ 。

关键词:京津冀;水资源;产业结构;优化适配模型

中图分类号:TV214.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)02-0020-07

Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in Beijing-Tianjin-Hebei region// WU Dan¹, XIANG Xiaoqian¹, JI Chenhui² (1. School of Economics and Management, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Imperial College London, London SW7 2AZ, UK)

Abstract: Based on the specific regional and water conditions of the Beijing-Tianjin-Hebei region, the rigid constraints of water resources were strengthened, and the concept and framework of the adaptation of water resources and industrial structure optimization was clarified. The designing principle of the adaptation scheme and its corresponding objective function were constructed, the constraints of the adaptation scheme designing were determined, and the multi-objective optimization configuration model was integrated and established. The diagnosis criteria of the adaptation scheme were constructed, embedded in the multi-objective optimization configuration model, and the overall optimal allocation was realized. The results show that the overall objective optimization function value reaches 0.99 in the Beijing-Tianjin-Hebei region, verifying the feasibility of the adaptation framework and adaptation model. From 2000 to 2019, the relative adaptative degree of water resources allocation and economic development of Beijing-Tianjin, Beijing-Hebei and Tianjin-Hebei are in the range of $[0.80, 1.20]$, $[0.80, 1.00]$ and $[0.70, 1.20]$ respectively. In 2019, the relative adaptative degree of water resources allocation and economic development of Beijing-Tianjin, Beijing-Hebei and Tianjin-Hebei are 0.878, 0.975 and 1.110 respectively, which is in the diagnostic threshold interval $[0.8, 1.2]$.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; water resources; industrial structure; optimization adaptation model

水资源配置属于跨学科领域的复杂系统工程问题。国外水资源配置实践表明,多目标耦合、多主体交互参与、经济产业布局优化成为水资源优化配置的主要发展方向。Condon等^[1-4]提出,水资源配置的关键是统筹体现社会公平、经济效益、生态保护、风险控制等多维目标,促进水资源高效利用和水生态环境有效保护;Kerachian等^[5-8]提出,水资源配置在统筹体现多维目标的过程中,应重点加强不同相

关利益主体之间的利益交互,充分体现相关利益主体的利益诉求;Kathrin等^[5-10]提出,水资源配置重在推进经济产业布局优化,向水资源利用率高、水环境污染少的方向发展,以提高经济发展与水资源利用、水环境保护的适应性,并应用模拟技术、动态规划分析等相关优化理论,结合投入产出模型、模拟仿真技术、多元统计回归分析法、自然资本核算法、基尼系数数等方法,对水资源配置与经济产业布局优化问

基金项目:北京市自然科学基金(9202005);教育部人文社会科学研究青年基金(21YJCZH176);北方工业大学北京城市治理研究基地项目(21CSZ124)

作者简介:吴丹(1986—),男,副教授,博士,主要从事战略规划与资源管理研究。E-mail:wu_daniel@163.com

题进行了深入研究。此外,Mohammad 等^[9-11]提出,将适应性管理思路纳入水资源配置框架体系,作为有效解决水资源配置问题的关键途径。其中,与集体农业用水户行为相适应的水资源配置方法、气候变化下引入自适应机制的水资源配置方法现已成为学者们关注的研究热点。

立足我国的基本区情与水情,水资源配置实践受到各区域的政治稳定、经济发展、社会公平、水利科技创新、用水总量与效率、水污染排放与水生态保护等多种因素的影响制约,亟须加强水资源利益相关者的广泛参与。王亚华等^[12]提出的政治协商机制为我国区域水资源配置实践提供了可行思路。同时,学术界众多学者对水资源配置原则、模式和模型进行了深入探讨。通过持续推进黄河流域、松辽流域等我国各大流域的水资源配置实践,胡继连等^[13-16]提出了生活用水优先、保障粮食安全、尊重历史与现状、可持续发展、留有余量、生态用水保障等原则,完善了水资源配置原则框架体系。王宗志等^[17-20]逐步完善了“政府引导、市场主导、社会参与”的水资源混合配置模式,将水资源分配给流域内各行政区,作为流域内各行政区的用水总量控制指标。随着最严格水资源管理制度的落实和研究的进一步深化,如何破解水资源配置利用与经济产业发展的适应性这一关键性难题,成为学者们关注的焦点。为此,张玲玲等^[21-24]提出强化水资源管理“三条红线”刚性约束,根据经济产业用水需求与经济社会发展指标的互动反馈,建立多目标优化模型、系统动力学模型等水资源优化配置模型。此外,吴凤平等^[25-27]将判别准则嵌入模型中,充分体现水资源利益相关者的利益诉求,提高水资源配置的生态-经济服务价值^[28-29]。

综合学者们的观点,受到人类活动、气候变化、水资源供给变化、经济产业布局优化等众多因素影响,水资源配置的发展趋势表现为:在配置思想方面,已逐步实现“水资源供需平衡分析促进经济社会可持续发展”向“水资源配置利用与经济产业发展相适应”的思路转变;在配置方法方面,已逐步实现“多目标耦合配置模型”向“在多目标耦合配置模型中嵌入适应性诊断机制”的方向发展。在京津冀协同发展战略背景下,目前京津冀水资源配置迫切需要解决的核心问题主要包括两个方面:一是如何对京津冀水资源与产业结构优化适配方案进行合理设计,实现京津冀水资源统筹优化配置,充分体现京津冀地区经济社会发展目标;二是如何建立诊断准则,充分体现京津冀地区的利益诉求,提高京津冀水资源配置利用与经济产业发展的适应性。为此,本文立足京津冀的具体区情与水情,根据京津冀经济

产业用水需求与经济社会发展指标的互动反馈,构建多目标优化配置模型,以实现京津冀水资源统筹优化配置,破解京津冀水资源与产业结构优化适配难题。

1 京津冀水资源与产业结构优化适配框架

1.1 适配理念

京津冀水资源与产业结构优化适配涉及京津冀地区的人口、经济社会发展、产业结构优化、水资源环境约束等众多关键影响要素,属于典型的多目标优化决策问题。为破解京津冀水资源与产业结构优化适配难题,京津冀水资源配置利用亟须深入贯彻创新、协调、绿色发展理念,探索有利于京津冀水资源集约利用的产业发展格局。京津冀水资源与产业结构优化适配理念具体可表述为:

a. 深入贯彻创新发展理念,推进京津冀水资源管理体制机制创新。在水资源刚性约束下,通过强化京津冀地区双控行动,严控水资源利用上线,提高用水效率,实现京津冀水资源优化配置与经济布局优化,提高京津冀地区之间用水的公平性与效率性,统筹解决京津冀水资源瓶颈制约问题。

b. 深入贯彻协调发展理念,推进水资源刚性约束下京津冀协同发展。在转变经济、社会发展方式的双轮驱动作用下,通过加强京津冀水资源统筹配置与合作管理,提高京津冀地区之间水资源配置利用与经济产业的适应性,统筹解决京津冀各地区之间发展不平衡、不协调问题。

c. 深入贯彻绿色发展理念,推进京津冀水资源配置思路创新。在水资源利用上线、水生态保护红线、水环境质量底线的制度约束下,通过严控京津冀地区用水总量,严格限定京津冀地区水污染排放总量,提升京津冀自然水生态系统的稳定性和水生态服务功能。

1.2 适配思路

京津冀地区主要受到用水现状与未来需求、人口规模、灌溉面积和粮食产量、经济产值和用水效益等关键影响因素的制约。因此,依据京津冀水资源与产业结构优化适配理念,综合考虑京津冀水资源演变特征、经济社会发展用水需求变化特征,以京津冀为整体进行系统性思考,开展京津冀水资源与产业结构优化适配研究,具体思路见图 1。

京津冀水资源与产业结构优化适配的关键是进行适配方案设计,并将适配方案诊断准则嵌入适配方案设计中。其中:①针对适配方案设计,主要目的是在最严格水资源管理制度和水资源刚性约束下,立足京津冀的具体区情与水情,加强京津冀水资源

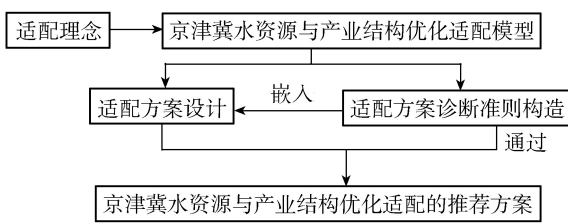


图1 京津冀水资源与产业结构优化适配研究思路

统筹优化配置。一是强化用水总量和用水效率控制,优先保障民生用水需求;二是在尊重历史与现状用水基础上,以京津冀用水需求为导向;三是加强水环境保护,严格限制京津冀水污染物排放量,实现京津冀水资源可持续利用。因此,可构建适配方案设计的目标函数,确定适配方案设计的约束条件,集成建立多目标优化配置模型,统筹协调京津冀地区之间的经济社会发展用水需求。②针对适配方案诊断准则构造,主要目的是诊断京津冀地区之间水资源配置利用与经济发

2 京津冀水资源与产业结构优化适配模型设计

依据图1中的适配方案设计目的,参照现有水资源配置原则框架体系^[13-16],结合最严格水资源管理制度、京津冀协同发展战略、京津冀地区“十四五”发展规划,确定用水总量控制、民生保障、尊重历史与现状、需求导向、要素匹配、用水效率控制、纳污控制、区域协调发展8大原则,构建各原则对应的单目标优化函数,确定适配方案设计的总体目标优化函数和约束条件,集成建立多目标优化配置模型,进行京津冀地区水资源统筹优化配置。

2.1 单目标优化函数

a. 用水总量控制目标优化函数 S_1 可表示为

$$S_1 = \min(S_{1i}) \quad (1)$$

其中
$$S_{1i} = \begin{cases} 1 & W_{it} \leq W_{c,it} \\ 0 & W_{it} > W_{c,it} \end{cases}$$

式中: S_{1i} 为第 t 年京津冀第 i 地区($i=1,2,3$ 分别代表北京、天津、河北)用水总量控制的满意度; W_{it} 为第 t 年第 i 地区的水资源配置量; $W_{c,it}$ 为第 t 年第 i 地区的用水总量刚性约束目标。

b. 民生保障目标优化函数 S_2 可表示为

$$S_2 = \min(S_{2i}) \quad (2)$$

其中
$$S_{2i} = \begin{cases} 1 & W_{it} \geq (W_{1,it} + W_{a,it}) \\ 0 & W_{it} < (W_{1,it} + W_{a,it}) \end{cases}$$

式中: S_{2i} 为保障第 t 年京津冀第 i 地区的居民生活用水需求和粮食生产安全用水需求的满意度; $W_{1,it}$ 、 $W_{a,it}$ 分别为第 t 年京津冀第 i 地区的居民生活用水需求、粮食生产安全用水需求。

c. 尊重历史与现状目标优化函数 S_3 可构造为

$$S_3 = \min(S_{3i}) \quad (3)$$

其中
$$S_{3i} = \begin{cases} 1 & \frac{W_{it}}{\sum_{i=1}^3 W_{it}} \geq S_{3i}^* \\ \frac{W_{it}}{\sum_{i=1}^3 W_{it}} / S_{3i}^* & \frac{W_{it}}{\sum_{i=1}^3 W_{it}} < S_{3i}^* \end{cases}$$

式中: S_{3i} 为第 t 年京津冀第 i 地区水资源配置比例与现状用水比例相比的满意度; S_{3i}^* 为第 t 年第 i 个地区的现状用水比例。

d. 需求导向目标优化函数 S_4 可表示为

$$S_4 = \min(S_{4i}) \quad (4)$$

其中
$$S_{4i} = \begin{cases} W_{it}/W_{d,it} & W_{it} < W_{d,it} \\ 1 & W_{it} \geq W_{d,it} \end{cases}$$

式中: S_{4i} 为保障第 t 年京津冀第 i 地区经济社会用水需求的满意度; $W_{d,it}$ 为第 t 年第 i 地区经济社会用水需求。

e. 要素匹配目标优化函数 S_5 可表示为

$$S_5 = \min(S_{5i}) \quad (5)$$

其中
$$S_{5i} = \begin{cases} W_{it}/W_{5i}^* & W_{it} < W_{5i}^* \\ 1 & W_{it} \geq W_{5i}^* \end{cases}$$

$$W_{5i}^* = \left(r_1 \frac{P_{it}}{\sum_{i=1}^3 P_{it}} + r_2 \frac{A_{it}}{\sum_{i=1}^3 A_{it}} + r_3 \frac{C_{it}}{\sum_{i=1}^3 C_{it}} \right) W_t$$

式中: S_{5i} 为第 t 年京津冀第 i 地区水资源配置与经济社会发展相适应的满意度; W_{5i}^* 为第 t 年第 i 地区综合人口、灌溉面积、经济产值指标的水资源配置量; P_{it} 、 A_{it} 、 C_{it} 分别为第 i 地区的人口、灌溉面积、经济产值; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为 P_{it} 、 A_{it} 、 C_{it} 的相对重要性,可依据京津冀地区现状的人口比例、灌溉面积比例、经济产值比例和用水比例,通过专家咨询予以确定; W_t 为第 t 年京津冀水资源配置总量。

f. 用水效率控制目标优化函数 S_6 可表示为

$$S_6 = \frac{\min(S_{6i})}{\max(S_{6i})} \quad (6)$$

其中
$$S_{6i} = \begin{cases} f_{1i}(W_{it})/G_{it} & f_{1i}(W_{it}) < G_{it} \\ 1 & f_{1i}(W_{it}) \geq G_{it} \end{cases}$$

$$f_{1i}(W_{it}) = a_{i1}W_{i1} + a_{i2}W_{i2} + a_{i3}W_{i3}$$

式中: S_{6i} 为第 t 年京津冀第 i 地区经济效益的满意度; $f_{1i}(W_{it})$ 为第 t 年京津冀第 i 地区经济产值; W_{i1} 、 W_{i2} 、 W_{i3} 分别为第 t 年京津冀第 i 地区第一、第二、第三产业的水资源配置量; a_{i1} 、 a_{i2} 、 a_{i3} 分别为第 t 年京津冀第 i 地区单方水第一、第二、第三产业的产值;

G_{it} 为第 t 年京津冀第 i 地区经济产值的规划目标。

g. 纳污控制目标优化函数 S_7 可表示为

$$S_7 = \min(S_{7i}) \tag{7}$$

其中

$$S_{7i} = \begin{cases} 1 & f_{2i}(W_{it}) \leq L_{it} \\ 0 & f_{2i}(W_{it}) > L_{it} \end{cases}$$

$$f_{2i}(W_{it}) = a_{i2}W_{it}b_{i2} + a_{i3}W_{it}b_{i3}$$

式中: S_{7i} 为保障第 t 年京津冀第 i 地区废水排放量控制的满意度; $f_{2i}(W_{it})$ 为第 t 年京津冀第 i 地区废水排放量(本文仅考虑第二、第三产业); b_{i2} 、 b_{i3} 分别为第 t 年京津冀第 i 地区第二、第三产业单位产值的废水排放量; L_{it} 为第 t 年第 i 地区的废水排放刚性约束目标。

h. 区域协调发展目标优化函数 S_8 可表示为

$$S_8 = 1 - \sum_{i=1}^3 \left| \frac{W_{it}/W_{d,it} - \sum_{i=1}^3 W_{it} / \sum_{i=1}^3 W_{d,it}}{\sum_{i=1}^3 W_{it} / \sum_{i=1}^3 W_{d,it}} \right|^2 \tag{8}$$

式中: $\sum_{i=1}^3 W_{it} / \sum_{i=1}^3 W_{d,it}$ 为第 t 年京津冀整体的经济社会平均需水满意度。

2.2 总体目标优化函数与约束条件

总体目标优化函数 S 和约束条件可表示为

$$\begin{aligned} S &= \max \sum_{k=1}^8 \omega_k S_k \\ \text{s. t. } &\sum_{k=1}^8 \omega_k = 1 \\ \begin{cases} W_{it} = W_{i1} + W_{i2} + W_{i3} + W_{la,it} + W_{ea,it} \\ W_{ij} \leq W_{d,ij} \\ W_{la,it} \leq W_{l,1,it} \\ W_{ea,it} \leq W_{e,it} \\ Q_t \sum_{i=1}^3 W_{i1} \geq R_{t0} \\ a_{i1}W_{i1} + a_{i2}W_{i2} + a_{i3}W_{i3} \geq R_{it1} \\ a_{i2}W_{i2} \geq R_{it2} \\ a_{i3}W_{i3} \geq R_{it3} \\ a_{i2}W_{i2}b_{i2} \leq L_{it2} \\ a_{i3}W_{i3}b_{i3} \leq L_{it3} \\ \frac{a_{i3}W_{i3}}{a_{i1}W_{i1} + a_{i2}W_{i2} + a_{i3}W_{i3}} \geq \gamma_{it} \\ (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3) \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

式中: S_k 为第 k 项原则对应的目标优化函数; $W_{la,it}$ 、 $W_{ea,it}$ 分别为第 t 年京津冀第 i 地区的居民生活、河道外生态环境建设的水资源配置量,可按照其水资源需求量予以优先配置; W_{ij} 、 $W_{d,ij}$ 分别为第 t 年第 i 地区第 j 产业的水资源配置量和需求量,可根据京

津冀地区经济产业发展规划,通过专家咨询予以确定; $W_{e,it}$ 为第 t 年第 i 地区的河道外生态环境建设的水资源需求量,可根据京津冀地区人口规划、生态建设规划,通过专家咨询予以确定; R_{t0} 为第 t 年京津冀整体粮食总产量的最小规划值,考虑到粮食相对容易实现京津冀地区之间的交易与流转,因此以京津冀整体粮食总产量为约束; Q_t 为第 t 年京津冀整体的单方水粮食产量; R_{it1} 为按照现有增长模式,第 t 年第 i 地区达到的 GDP 最小规划值; R_{it2} 、 R_{it3} 分别为第 t 年第 i 地区第二、第三产业的产业增加值最小规划值; L_{it2} 、 L_{it3} 分别为第 t 年第 i 地区第二、第三产业的废水排放刚性约束目标; γ_{it} 为第 t 年第 i 地区第三产业占 GDP 比重,反映京津冀地区产业结构高级化程度; ω_k 为赋予目标优化函数 S_k 的权重,考虑 8 大原则具有同等重要性,可采用等权法予以确定。

综上,结合式(1)~(9),集成建立多目标优化配置模型,该模型的决策变量为京津冀地区不同产业的水资源配置量。该模型同时受到京津冀地区及其产业的用水总量、用水强度、废水排放等刚性约束目标的影响,须依据京津冀地区及其产业的水资源需求量、经济社会发展参数予以确定。

3 优化适配方案诊断准则

针对京津冀水资源与产业结构优化适配方案设计,依据图 1 中的适配方案诊断目标,构造适配方案诊断准则,嵌入多目标优化配置模型。适配方案诊断准则主要用于诊断京津冀地区之间水资源配置利用与经济发展的适应性。为此,通过文献调研法和专家咨询法,采用人口、GDP、多年平均供水量、区域面积和有效灌溉面积等指标,作为具有代表性的经济社会综合考量指标,采用加权综合指数法,诊断京津冀地区间水资源配置利用与经济发展的相对适应度,可用公式表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\min} \frac{M_{it}}{M_{i't}} &\leq \frac{W_{it}}{W_{i't}} \leq \varepsilon_{\max} \frac{M_{it}}{M_{i't}} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} M_{it} = \sum_{k=1}^5 (w_k Y_{ikt}) \\ \sum_{k=1}^5 w_k = 1 \\ M_{it} \geq M_{i't} \Rightarrow W_{it} \geq W_{i't} \\ i \neq i' \end{cases} \end{aligned} \tag{10}$$

式中: W_{it} 、 $W_{i't}$ 分别为第 t 年京津冀第 i 地区、第 i' 地区的水资源配置量; M_{it} 、 $M_{i't}$ 分别为第 t 年第 i 地区、第 i' 地区的经济社会综合考量指标加权值,可依据京津冀地区经济社会综合考量指标予以确定; $\varepsilon_{\min}$ 、 $\varepsilon_{\max}$ 分别为适应性诊断阈值的下限、上限,依据京津

冀地区水资源配置现状与经济发展现状进行测算,分别设定为0.8、1.2。 Y_{ikt} 为第 t 时期第 i 地区第 k 指标值占京津冀整体第 k 指标值的比重; w_k 为第 k 指标的权重,为减少人为因素的干扰,采用等权法确定指标权重;约束条件 $M_{it} \geq M_{i't} \Rightarrow W_{it} \geq W_{i't}$ 表示第 t 时期京津冀第 i 地区、第 i' 地区的经济发展综合指标加权值与水资源配置利用量同向变动。

4 模型验证

为保障构建的京津冀协同发展下水资源与产业结构优化适配模型切实可行,依据现状水平年2019年京津冀地区宏观经济、产业结构、水资源配置利用、废水排放和粮食生产等数据,验证模型的有效性。数据主要来源于《中国水资源公报》《北京市水资源公报》《天津市水资源公报》《河北省水资源公报》。针对北京、河北历年的《水资源公报》,没有将第一产业、第二产业和第三产业的水资源配置量单独列出。《天津市水资源公报》对2003—2017年三次产业水资源配置情况进行了统计。为此,依据《天津市水资源公报》和《中国水资源公报》,测算2019年天津第一产业与农业用水量、第二产业与工业用水量、居民生活与生活用水量的折算系数。同时,通过对京津冀地区及其产业的用水量和用水效率的历史数据差异进行对比分析,可模拟推导和估算北京、河北三次产业用水和居民生活用水量。此外,自2003年之后,《海河流域水资源公报》开始提供全流域工业及建筑业废水排放和第三产业废水排放量的分项数据。根据2004—2017年海河流域、京津冀地区的废水排放量数据,可估算得到京津冀地区第二产业和第三产业废水排放量。现状水平年2019年京

津冀水资源与产业结构优化适配模型参数见表1。
根据表1及现状水平年(2019年)京津冀地区及其产业的水资源配置量(表2),对京津冀水资源与产业结构优化适配模型进行检验。

4.1 多目标优化配置模型检验

根据表1和表2,结合现状水平年2019年京津冀地区及其产业的水资源配置量,应用构建的多目标优化配置模型,检验现状水平年2019年适配方案的成效。通过模型计算,首先,得到京津冀总体目标优化函数值达到0.99,其中,用水总量控制、基本民生保障、尊重历史与现状、未来需求导向、高效性、水环境保护、可持续利用7大原则对应的目标优化函数值均达到最大值1.00,仅公平性原则对应的目标优化函数值为0.92。其次,京津冀地区及其产业的水资源配置量均满足式(9)中的约束条件。因此,京津冀地区现状水资源配置方案充分验证了多目标优化配置模型的可行性。

4.2 诊断准则检验

从诊断结果来看,2000—2019年京津冀地区水资源配置利用与经济发展的相对适应性变化,见图2。
根据图2,2000—2019年,北京-天津、北京-河北、天津-河北水资源配置利用与经济发展的相对适应度分别处于[0.80,1.20]、[0.80,1.00]、[0.70,1.20]区间,其中,2019年,北京-天津、北京-河北、天津-河北的水资源配置利用与经济发展的相对适应度分别为0.878、0.975、1.110,位于诊断阈值区间[0.8,1.2]。同时,京津冀地区间水资源配置利用量与经济发展综合指标加权值保持同向变动。因此,京津冀地区现状水资源配置方案满足适配方案诊断准则。

表1 2019年京津冀水资源与产业结构优化适配模型参数

区域	水资源利用效率/ (元·m ⁻³)			废水产生系数/ (t·万元 ⁻¹)			GDP/亿元				废水排放 限额/亿t		粮食产出 效率/(万t· 亿m ⁻³)	粮食 产量/ 万t
	第一 产业	第二 产业	第三 产业	第二 产业	第三 产业	全产业	第一 产业	第二 产业	第三 产业	总计	第二 产业	第三 产业		
北京市	30.41	1654.28	2931.20	2.69	0.85	3.29	113.7	5715.06	29542.53	35371.29	1.54	2.50	7.75	29
天津市	19.92	962.70	4710.46	6.62	1.63	5.65	185.23	4969.18	8949.87	14104.28	3.29	1.46	23.98	223
河北省	30.46	706.72	2934.55	10.26	1.75	7.49	3518.44	13597.26	17988.82	35104.52	13.95	3.14	32.37	3739

表2 2019年京津冀地区水资源配置量 单位:亿m³

类别	北京市	天津市	河北省
第一产业	3.74	9.30	115.50
第二产业	3.45	5.76	19.24
第三产业	10.04	1.90	6.13
居民生活	8.47	5.25	19.34
河道外生态环境	16.00	6.20	22.10
总计	41.70	28.40	182.30

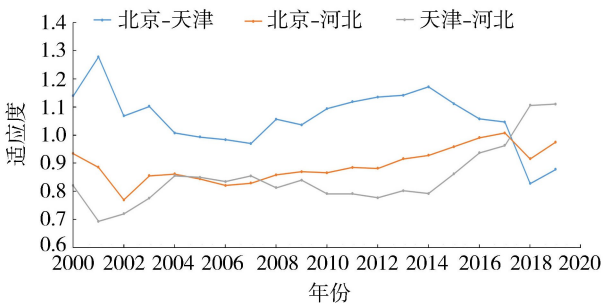


图2 2000—2019年京津冀地区间水资源配置利用与经济发展的相对适应度

综上,京津冀地区现状水资源配置方案充分验证了京津冀水资源与产业结构优化适配模型的可行性。

5 结 语

通过对国内外水资源配置研究进展进行系统梳理,从配置思想和配置方法等方面,明确了水资源配置的发展趋势。立足京津冀的具体区情与水情,提出了京津冀协同发展下水资源统筹配置迫切需要解决的核心问题,明确了破解京津冀水资源与产业结构优化适配难题的思路:①提出了京津冀水资源与产业结构优化适配理念与框架;②构建了京津冀水资源与产业结构优化适配方案设计的多目标优化配置模型;③构造了京津冀水资源与产业结构优化适配方案的诊断准则。通过将诊断准则嵌入多目标优化配置模型中,获得京津冀水资源与产业结构优化适配的推荐方案。最终,结合现状水平年 2019 年京津冀水资源配置实践,验证了适配框架与适配模型的可行性。

京津冀水资源与产业结构优化适配过程中,不仅要满足多目标优化配置模型,同时要保障通过诊断准则。诊断准则主要用于诊断京津冀地区间水资源配置利用与经济发展的相对适应度。诊断结果受适应性诊断阈值的下限、上限参数选取的影响较大。因此,诊断准则在京津冀地区和其他地区推广应用时,必须立足地区区情与水情,依据地区水资源配置现状与经济发展现状合理选适应性诊断取阈值参数。同时,必须对京津冀地区间的水资源配置量进行适应性调整,最终确定京津冀水资源与产业结构优化适配的推荐方案。京津冀地区水资源配置的适应性调整过程是以适配方案诊断结果为依据,通过逆向追踪法,探寻导致适配方案诊断结果存在不合理性的根源,反向追踪并识别不适配的地区。该适应性调整过程是京津冀地区利益相关者共同参与的一个动态博弈过程,如何通过政府引导,加强京津冀地区之间的合作,建立地区间交互的利益补偿机制,实现水资源配置量增加利益主体对水资源配置量减少利益主体的利益补偿;同时,如何建立一套完善的京津冀水资源与产业结构优化适配方案实施的配套保障制度,推进京津冀协同发展。这些问题亟待进行深化研究,成为未来需要进一步研究的方向。

参考文献:

[1] ZHANG W, WANG Y, PENG H, et al. A coupled water quantity-quality model for water allocation analysis [J]. Water Resources Management, 2010, 24 (3) : 485-511.

[2] CONDON L E, MAXWELL R M. Implementation of a linear optimization water allocation algorithm into a fully integrated physical hydrology model [J]. Advances in Water Resources, 2013, 60: 135-147.

[3] CAMPENHOUT B V, D' EXELLE B, LECOUTERE E. Equity-efficiency optimizing resource allocation; the role of time preferences in a repeated irrigation game [J]. Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 2015, 77 (2) : 234-253.

[4] HU Z, WEI C, YAO L, et al. A multi-objective optimization model with conditional value-at-risk constraints for water allocation equality [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 330-342.

[5] KERACHIAN R, FALLAHNIA M, BAZARGAN-LARI M R, et al. A fuzzy game theoretic approach for groundwater resources management: application of Rubinstein bargaining theory [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54 (10) : 673-682.

[6] READ L, MADANI K, INANLOO B. Optimality versus stability in water resource allocation [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 133 (15) : 343-354.

[7] XIE Y L, HUANG G H, LI W, et al. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management in Nansihu Lake Basin, China [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 127: 188-205.

[8] KATHRIN K, CLAUDIA P. A framework for the analysis of governance structures applying to groundwater resources and the requirements for the sustainable management of associated ecosystem services [J]. Water Resources Management, 2011, 25 (13) : 3387-3411.

[9] SYME G J. Acceptable risk and social values; struggling with uncertainty in Australian water allocation [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28 (1) : 113-121.

[10] NULL S E, PRUDENCIO L. Climate change effects on water allocations with season dependent water rights [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571: 943-954.

[11] TASKHIRI M S, TAN R R, CHIUSASF. Emergy-based fuzzy optimization approach for water reuse in an eco-industrial park [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55 (7) : 730-737.

[12] 胡鞍钢, 王亚华. 转型期水资源配置的公共政策: 准市场和政治民主协商 [J]. 中国软科学, 2000 (5) : 5-11. (HU Angang, WANG Yahua. China's public policy of water resources allocation in transition: quasi-market, political and democratic consultation [J]. China Soft Science, 2000 (5) : 5-11. (in Chinese))

[13] 胡继连, 葛颜祥. 黄河水资源的分配模式与协调机制 [J]. 管理世界, 2004 (8) : 43-60. (HU Jilian, GE Yanxiang. The allocation mode and coordination mechanism of water resources in the Yellow River [J]. Management World, 2004 (8) : 43-60. (in Chinese))

[14] 王金霞, 黄季焜, Scott Rozelle. 激励机制、农户参与和节

- 水效应:黄河流域灌区水管理制度改革的实证研究[J]. 中国软科学,2004(11):8-14. (HUANG Jinxia, HUANG Jikun, SCOTT R. Incentive, participation of farmers and water savings: empirical research on the reform of water management institution in the irrigation districts of the Yellow River Basin [J]. China Soft Science,2004(11):8-14. (in Chinese))
- [15] 王浩,党连文,汪林,等. 关于我国水权制度建设若干问题的思考[J]. 中国水利,2006(1):28-30. (WANG Hao,DANG Lianwen,WANG Lin,et al. Discussion on the construction of water rights system in China [J]. China Water Resources,2006(1):28-30. (in Chinese))
- [16] 夏朋,倪晋仁. 流域水权初始分配机制中的节水激励[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(3):206-210. (XIA Peng, NI Jinren. Incentive to save water in water right initial allocation mechanism based on river basin [J]. China Population, Resources and Environment,2008,18(3):206-210. (in Chinese))
- [17] 王宗志,胡四一,王银堂. 基于水量与水质的流域初始二维水权分配模型[J]. 水利学报,2010,41(5):524-530. (WANG Zongzhi, HU Siyi, WANG Yintang. Initial two-dimensional water right allocation modeling based on water quantity and water quality in the river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(5):524-530. (in Chinese))
- [18] 王宗志,张玲玲,王银堂,等. 基于初始二维水权的流域水资源调控框架初析[J]. 水科学进展,2012,23(4):590-598. (WANG Zongzhi, ZHANG Lingling, WANG Yintang, et al. Preliminary theoretical framework of water resources operation based on initial two-dimensional water rights in a basin [J]. Advances in Water Science,2012,23(4):590-598. (in Chinese))
- [19] 吴丽,田俊峰. 区域产业结构与用水协调的优化模型及评价[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(4):51-54. (WU Li, TIAN Junfeng. Optimal model of coordination between industrial structure and water resources utilization as well as its evaluation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011,9(4):51-54. (in Chinese))
- [20] 陈妍彦,张玲玲. 水资源约束下的区域产业结构优化研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):50-22. (CHEN Yanyan, ZHANG Lingling. Research on optimization of regional industrial structure under restriction of water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014,25(6):50-22. (in Chinese))
- [21] 张玲玲,王宗志,李晓惠,等. 总量控制约束下区域用水结构调控策略及动态模拟[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(1):90-96. (ZHANG Lingling, WANG Zongzhi, LI Xiaohui, et al. Study on regional water utilization structure controlling strategy and dynamic simulation within the gross volume constraints [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(1):90-96. (in Chinese))
- [22] 徐志伟. 基于地区-产业双重维度的京津冀生产用水资源优化研究[J]. 区域经济评论,2013,46(1):62-68. (XU Zhiwei. Research on optimization of water resources for production use in Beijing-Tianjin-Hebei based on the dual dimensions of region and industry [J]. Regional Economic Review,2013,46(1):62-68. (in Chinese))
- [23] 赵岩,黄鑫鑫,王红瑞,等. 基于区间数多目标规划的河北省水资源与产业结构优化[J]. 自然资源学报,2016,31(7):1241-1250. (ZHAO Yan, HUANG Xinxin, WANG Hongrui, et al. Water resources and industrial structure optimization of Hebei Province based on interval multi-objective programming [J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(7):1241-1250. (in Chinese))
- [24] 吴丹,王亚华. 双控行动下流域初始水权分配的多层递阶决策模型[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(11):215-224. (WU Dan, WANG Yahua. Modeling for multi-layer hierarchical decision-making of initial water rights allocation in the river basin with water resources dual control action [J]. China Population, Resources and Environment,2017,27(11):215-224. (in Chinese))
- [25] 吴凤平,吴丹,陈艳萍. 流域初始水权配置系统方案诊断模型[J]. 系统工程,2010,28(4):24-29. (WU Fengping, WU Dan, CHEN Yanping. The diagnosis model of basin initial water right allocation system theme [J]. Systems Engineering,2010,28(4):24-29. (in Chinese))
- [26] 陈艳萍,吴凤平,吴丹,等. 基于和谐性诊断的初始水权配置方法[J]. 系统工程,2011,29(5):68-72. (CHEN Yanping, WU Fengping, WU Dan, et al. Basin initial water rights allocation method based on harmony diagnosis [J]. Systems Engineering,2011,29(5):68-72. (in Chinese))
- [27] 吴丹,吴凤平,陈艳萍. 流域初始水权配置复合系统双层优化模型[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(1):196-202. (WU Dan, WU Fengping, CHEN Yanping. The bi-level optimization model of the compound system for basin initial water right allocation [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012,32(1):196-202. (in Chinese))
- [28] 张丽娜,吴凤平,贾鹏. 基于耦合视角的流域初始水权配置框架初析:最严格水资源管理制度约束下[J]. 资源科学,2014,36(11):2240-2247. (ZHANG Lina, WU Fengping, JIA Peng. A preliminary theoretical framework of basin initial water rights allocation from a coupling perspective and when constrained by the strictest water resources management system [J]. Resources Science, 2014,36(11):2240-2247. (in Chinese))
- [29] 匡洋,李浩,夏军,等. 气候变化对跨境水资源影响的适应性评估与管理框架[J]. 气候变化研究进展,2018,14(1):67-76. (KUANG Yang, LI Hao, XIA Jun, et al. Impacts of climate change on transboundary water resources and adaptation management framework [J]. Climate Change Research, 2018,14(1):67-76. (in Chinese))

(收稿日期:2021-03-03 编辑:郑孝宇)