

李家乐, 林鹏飞, 李彦彬, 等. 基于水资源配置的空间均衡度评价方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 215-227. LI J L, LIN P F, LI Y B, et al. Evaluation method for spatial balance based on water resource allocation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 215-227. (in Chinese)

基于水资源配置的空间均衡度评价方法

李家乐^{1,2}, 林鹏飞², 李彦彬¹, 游进军², 付敏²

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为量化水资源配置对空间均衡的提升作用, 系统评价水资源配置方案空间均衡度, 研究基于水资源配置系统“水源-供水设施-受水区-用水户”的整体结构, 从水源均衡、设施均衡、单元均衡和用户均衡 4 个方面分别选择了均衡度评价指标, 构建水资源配置空间均衡度综合评价指标体系, 并提出基于熵权-TOPSIS 法的水资源配置空间均衡度评价方法。以昌邑市水资源配置系统为例, 设置 12 种水资源配置方案来探究不同调控措施对水资源配置空间均衡度的影响。结果表明: 该方法不仅可以量化不同调控措施对水源均衡、设施均衡、单元均衡和用户均衡的影响效果, 还能够评估配置系统整体的水资源配置空间均衡度, 可为水资源配置与空间均衡相关研究提供借鉴。

关键词: 水资源配置; 空间均衡; 熵权法; TOPSIS 方法; 昌邑市

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0023

水资源空间不均衡问题, 逐渐成为区域发展面对的问题^[1]。水资源均衡分配不是单一水源对单一用户的简单分配问题, 而是由多种水源、多种用户、多级工程组成的复杂水量调配问题。因此, 从水资源配置系统整体出发, 分析水量分配的空间均衡度十分必要。

为深入贯彻落实习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路, 国内学者围绕水资源“空间均衡”开展了大量研究。郦建强等^[2-3]分析了水资源空间均衡的基本特征, 探究了其理论基础, 并提出了水资源空间均衡程度的概念。杨亚锋等^[4]基于可变集原理及偏联系数方法构建了水资源空间均衡评估模型, 并对水资源空间均衡状况进行评估。左其亭等^[5]基于 GIS 空间分析和统计数据的量化分析, 提出了空间均衡系数和总体空间均衡程度的概念和计算方法。金菊良等^[6]综合考虑水资源-经济社会-生态环境的复合关系, 提出了基于联系数和耦合协调度相结合的评价方法。缪昭旺等^[7]建立水资源空间均衡评价指标体系, 提出了水资源空间均衡耦合评价模型。Yang 等^[8-10]将评价方法与

可变模糊集、区域评价等结合, 分析了长江经济带的水资源空间均衡。除此之外, 也有学者对流域水资源的开发利用程度、时空分异特征、水环境承载力等方面进行了评价, 以研究水资源在不同方面的均衡性^[11-13]。

水资源配置工程可以对天然水资源进行再分配, 根据水资源可开发利用量确定经济社会合理的发展规模、结构和布局, 提升区域发展模式与水资源条件的适应性^[14-15]。水资源配置是解决水资源空间不均衡的主要措施, 因此相关学者围绕水资源配置与空间均衡开展了研究工作。樊红梅等^[16]利用基于空间均衡的水资源配置模型研究了通辽市科尔沁区的水资源配置合理性。Feng 等^[17-18]使用水资源优化配置模型分析流域内水资源的均衡程度。同时, 部分学者^[19-20]也在水资源空间均衡效果评价方面开展了研究工作, 将水资源配置与其他评价模型相结合, 分析区域水资源供需调控对水资源空间均衡的影响效果。

TOPSIS 法可以综合多个指标进行评价, 因此在水资源均衡配置的相关研究中采用较多。邵莉^[21]

收稿日期: 2023-11-24 修回日期: 2024-03-19 网络出版时间: 2024-04-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240401.1105.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204601; 2023YFF1304202); 国家自然科学基金项目(52079143; 52209042)

作者简介: 李家乐(1998—), 男, 河南安阳人, 主要从事水资源配置研究。E-mail: 490554145@qq.com

通信作者: 林鹏飞(1989—), 男, 山东海阳人, 工程师, 博士, 主要从事水资源配置研究。E-mail: linpf@iwahr.com

构建了博弈论组合赋权的 TOPSIS 评价模型,并应用该模型对研究区水资源配置方案进行评价。龚艳冰^[22]提出一种基于正态云组合赋权和云相似度 TOPSIS 法的水资源配置方案综合评价方法,并对天津市水资源配置方案进行评价。进一步地, TOPSIS 法可以与熵权法结合,较为客观地对研究对象进行评价,该方法也普遍应用于相关领域。杨丹^[23]利用熵权-TOPSIS 法对豫北某县的水资源优化配置结果进行评价。张玉祥等^[24]利用熵权-TOPSIS 法筛选出乌苏市水资源优化配置的最佳方案。此外,不同目标权重以及不同水资源配置情景对空间均衡程度的影响也被广泛讨论^[25-26]。

综上所述,目前在水资源空间均衡与水资源配置方面的研究,大多关注需水端经济社会或生态效益最大化,对水资源配置各环节的均衡性研究较少。水源端以提高供水保障能力为重点,并将配置系统中的供水设施作为模型的约束条件,对于各水源之间、供水设施之间的均衡性考虑不足。以往的评价方法多基于静态的天然水资源量,未考虑水资源调配过程中水量的动态调入、调出量。水资源配置空间均衡需要实现水资源与人口、经济、生态环境等多要素的优化配置,维持多维度、多要素和多目标的平衡关系。因此,水资源配置空间均衡不仅需要考虑需水及受水端均衡,还需要考虑水源端和供水中间环节的均衡性,以提升水资源配置系统整体的空间均衡度。本文在已有研究基础上,将水资源配置系统与空间均衡相结合,提出水资源配置空间均衡评价方法,并以山东省昌邑市为例,评价不同水资源配置情景方案下的水资源配置空间均衡度,为研究区未来的水资源开发利用及调控方向提供技术支撑。

1 研究方法

1.1 水资源配置空间均衡内涵解析

在物理学、经济学、工程学、生态学等领域中,学者们都提出了“均衡”的概念和内涵,不同领域对“均衡”具有一个共同的认识,即均衡是系统整体或系统内部的一种稳定的协调状态,实现均衡就是要实现系统整体或系统内部稳定的协调发展^[27]。

将“均衡”进一步扩展到“水资源空间均衡”,从资源分配层面分析就是实现人口经济与资源环境之间的均衡状态^[28],实现人口规模、产业结构等

要素与水资源、水生态、水环境承载能力相适应。

将“水资源空间均衡”与水资源配置的目的、功能、特征等结合,“水资源配置空间均衡”是指通过配置手段将水资源分配到不同区域和用水户,实现区域内水资源、经济社会和生态环境三者之间的协调发展,以及区域间的协调发展^[29],提升水资源配置系统供水量和供用水过程的均衡性和稳定性。

根据水资源配置系统水源-供水设施-受水区-用水户的整体结构,分析水资源配置空间均衡的内涵,主要包括以下几方面:(1)水源均衡。水源作为配置系统的根本,水资源的开发利用应与当地的水资源赋存条件相协调,才能维持良好的水生态环境,实现水资源可持续开发利用。(2)设施均衡。供水设施的布局 and 规模决定了能否将水资源有效分配给用水户,一般要求供水设施在常态时盈余一定供水能力,在极端枯水或者突发事件时能够扩大供水范围,保障水资源配置系统整体的供水安全。因此各供水设施的供水量应当与其供水能力相协调,从而维持一定的应急供水潜力。(3)单元均衡。水量配置的核心是实现水资源与各单元的人口要素、经济要素、生态环境要素的优化配置,需要考虑水资源空间分配的公平性和高效性,保障区域水资源和经济社会的协调发展。(4)用户均衡。用水户是水资源配置系统的终端,是配置系统最直接的服务对象,对不同的用水户需要实现尽量均衡的供水状态,满足各类用水户的基本用水需求。

1.2 水资源配置空间均衡度计算思路

为了评价水资源配置空间均衡度,按照水资源配置方案集设置、评价指标体系构建和均衡度计算方法三方面开展研究。通过构建水资源配置模型,考虑不同的水源条件、水利工程组合以及需水情景设置水资源配置方案集,并针对不同的水资源配置方案结果开展水资源配置空间均衡评价。均衡度评价指标体系主要与水资源配置空间均衡内涵结合,分析不同配置环节的主要影响因素,从水资源配置系统全过程确定指标层、准则层和目标层关键指标,并以此建立三层次指标体系。水资源配置空间均衡度评价主要利用熵权-TOPSIS 方法,分别量化准则层均衡度和目标层均衡度。通过分析各配置方案集的均衡度差异,分析不同调控措施对水资源配置空间均衡度的影响。计算思路见图 1。

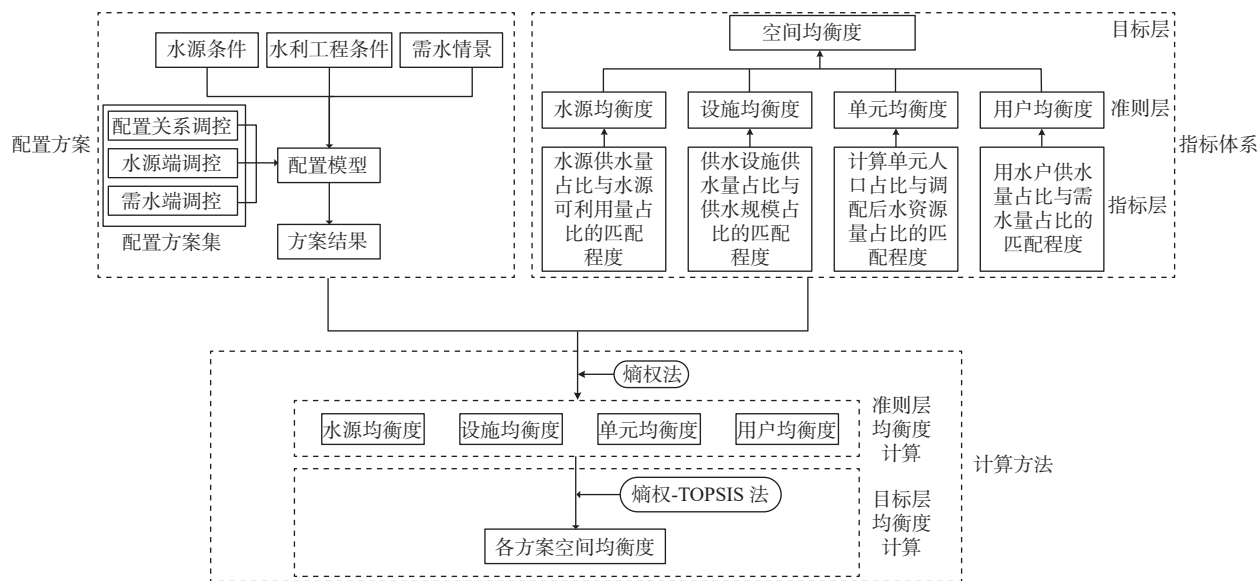


图1 水资源配置空间均衡度计算思路

Fig. 1 Calculation ideas of spatial balance degree of water resources allocation

1.3 水资源配置空间均衡度评价指标

按照评价指标体系的结构特征,水资源配置空间均衡度评价指标体系由目标层、准则层和指标层组成,见表1。其中,目标层为配置系统整体的空间均衡程度;准则层与水资源配置空间均衡内涵结合,主要包括水源均衡层、设施均衡层、单元均衡层和用户均衡层。水源均衡层考虑水资源配置系统的不同水源,选取本地地表水、地下水、外调水和非常规水,选用水源供水量占比与水源可利用量占比的匹配程度作为指标;设施均衡层考虑水资源配置系统的各类供水工程,主要包括水库、水厂、泵站、闸门等,选取供水设施供水量占比与供水规模占比的匹配程度作为指标;单元均衡层主要考虑水资源分区或者行政分区,可以为最基本计算单元也可以为不同层级的统计单元,选取计算单元人口占比与调配后水资源量占比的匹配程度作为指标;用户均衡层主要包括城镇生活、农村生活、工业、农业、城镇生态、农村生态等,选取用水户供水量占比与需水量占比的匹配程度作为指标。

1.3.1 水源均衡指标

长期依赖单一水源供水会增加供水系统的风险,多水源综合利用不仅能有效缓解区域供需紧张情势,也有利于维持水资源开发利用的可持续性^[30]。因此选用水源供水量占比与可利用量占比的匹配程度作为衡量水源均衡的指标。计算公式为

$$E_{i,a} = |R_{i,a} - Q_{i,a}| \quad (1)$$

$$R_{i,a} = \frac{F_{i,a}}{\sum_{a=1}^A F_{i,a}} \quad (2)$$

$$Q_{i,a} = \frac{G_{i,a}}{\sum_{a=1}^A G_{i,a}} \quad (3)$$

式中: $E_{i,a}$ 为第*i*个方案中第*a*个水源供水量占比与可利用量占比的匹配程度(无量纲),取值范围为[0, 1]; $R_{i,a}$ 为第*i*个方案中第*a*个水源供水量占有所有水源总供水量的比例(无量纲); $Q_{i,a}$ 为第*i*个方案中第*a*个水源可利用量占有所有水源总可利用量的比例(无量纲); $F_{i,a}$ 为第*i*个方案中第*a*个水源的供水量,万 m^3 ; $G_{i,a}$ 为第*i*个方案中第*a*个水源的可利用量,万 m^3 ; A 为水源总数。当 $E_{i,a} = 0$ 时,表示水源的供水量与可利用量完全匹配;当 $E_{i,a} = 1$ 时,表示水源的供水量与可利用量完全不匹配。其中,本地地表水水源的可利用量根据水资源调查评价确定的多年平均地表水供水能力确定;地下水可利用量根据评价的地下水可开采量或地下水管控指标确定;外调水可利用量根据外调水量分配指标确定;再生水可利用量根据收集的污水量、再生水厂规模及再生水回用率等进行推算。

1.3.2 设施均衡指标

供水设施是保障供水系统安全性的关键环节,水厂通过原水管道与水源连通,通过净水管与用水户连通。供水设施的布局、规模和供水过程决定着区域水资源配置空间均衡度。考虑到供水设施在常态下应盈余一定供水能力,故选取各供水设施供水量占比与供水规模占比的匹配程度作为衡量供水设施均衡的指标。

表 1 水资源配置空间均衡度评价指标体系
Tab. 1 Spatial balance evaluation index system for water resources

目标层	准则层	指标层	指标含义	属性
水资源配置空间均衡度	水源均衡	本地地表水	水源的供水量占比与可利用量占比之差	负向
		地下水		
		外调水		
		再生水		
	设施均衡	水库	供水设施的供水量占比与供水规模占比之差	负向
		水厂		
		泵站		
		闸门		
	单元均衡	计算单元1	计算单元的人口占比与水资源量占比之差	负向
		计算单元2		
		计算单元3		
			
		计算单元n		
	用户均衡	城镇生活	用水户的供水量占比与需水量占比之差	负向
		农村生活		
工业				
农业				
城镇生态				
	农村生态			

注: n 为配置系统的计算单元总数。

供水设施均衡指标的计算公式为

$$V_{i,b} = |H_{i,b} - J_{i,b}| \quad (4)$$

$$H_{i,b} = \frac{I_{i,b}}{\sum_{b=1}^B I_{i,b}} \quad (5)$$

$$J_{i,b} = \frac{K_{i,b}}{\sum_{b=1}^B K_{i,b}} \quad (6)$$

式中: $V_{i,b}$ 为第*i*个方案中第*b*个供水设施的供水量占比与供水规模占比的匹配程度,取值范围为[0, 1]; $H_{i,b}$ 为第*i*个方案中第*b*个供水设施的供水量占比; $J_{i,b}$ 为第*i*个方案中第*b*个供水设施的供水规模占比; $I_{i,b}$ 为第*i*个方案中第*b*个供水设施的供水量,万 m^3 ; $K_{i,b}$ 为第*i*个方案中第*b*个供水设施的供水规模,万 m^3 ; B 为供水设施总数。当 $V_{i,b} = 0$ 时,表示供水设施的供水量与供水规模完全匹配,当 $V_{i,b} = 1$ 时,表示供水设施的供水量与供水规模完全不匹配。

1.3.3 单元均衡指标

按照经济地理学的原理,要素的非协同集聚造

成了区域差异,当其中某一要素的集聚速度快于另一个要素时,将造成二者不匹配程度扩大^[31]。人口是水资源配置系统最重要的保障要素,因此选取各计算单元人口占比与水资源量占比的匹配程度作为单元均衡指标,计算公式为

$$U_{i,c} = |N_{i,c} - M_{i,c}| \quad (7)$$

$$N_{i,c} = \frac{P_{i,c}}{\sum_{c=1}^C P_{i,c}} \quad (8)$$

$$M_{i,c} = \frac{W_{i,c}}{\sum_{c=1}^C W_{i,c}} \quad (9)$$

$$W_{i,c} = L_{i,c} + \alpha_{i,c} - \beta_{i,c} \quad (10)$$

式中: $U_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计算单元人口与水资源量的匹配程度,取值范围为[0, 1]; $N_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计算单元的人口占比; $M_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计算单元的水资源量占比; $P_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计算单元的人口数量,人; $W_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计算单元经过水资源分配之后的水资源量,万 m^3 ; C 为计算单元总数; $L_{i,c}$ 为第*i*个方案中第*c*个计

算单元的本地水资源量, 万 m^3 ; $\alpha_{i,c}$ 为第 i 个方案中第 c 个计算单元从其他单元调入的水量, 万 m^3 ; $\beta_{i,c}$ 为第 i 个方案中第 c 个计算单元向其他单元调出的水量, 万 m^3 。当 $U_{i,c} = 0$ 时, 表示人口与水资源量完全匹配, 当 $U_{i,c} = 1$ 时, 表示人口与水资源量完全不匹配。

1.3.4 用户均衡指标

用水户需水量的满足程度是水资源配置空间均衡的重要因素, 需水量满足程度的差异性可以反映出不同用户之间的均衡情况。因此选取各用水户供水量占比与需水量占比的匹配程度为作为用户均衡指标。计算公式为

$$O_{i,d} = |S_{i,d} - X_{i,d}| \quad (11)$$

$$S_{i,d} = \frac{T_{i,d}}{D} \quad (12)$$

$$\sum_{d=1}^D T_{i,d}$$

$$X_{i,d} = \frac{Y_{i,d}}{D} \quad (13)$$

$$\sum_{d=1}^D Y_{i,d}$$

式中: $O_{i,d}$ 为第 i 个方案中第 d 个用水户的供水量占比与需水量占比的匹配程度, 取值范围为 $[0, 1]$; $S_{i,d}$ 为第 i 个方案中第 d 个用水户的供水量占比; $X_{i,d}$ 为第 i 个方案中第 d 个用水户的需水量占比; $T_{i,d}$ 为第 i 个方案中第 d 个用水户的供水量, 万 m^3 ; $Y_{i,d}$ 为第 i 个方案中第 d 个用水户的需水量, 万 m^3 ; D 为用水户总数。当 $O_{i,d} = 0$ 时, 表示用水户的供水量与需水量完全匹配, 当 $O_{i,d} = 1$ 时, 表示用水户的供水量与需水量完全不匹配。

1.4 水资源配置空间均衡度计算方法

为了保证评价结果的客观性, 采用熵权-TOPSIS 法对水资源配置空间均衡度进行综合评价。熵权法是一种客观赋权方法, 基本思路是根据指标变异性的确定客观权重, 降低了指标赋权时主观人为因素的干扰, 从而得到较为客观的指标权重。TOPSIS 法适用于多指标、多方案的综合评价, 能够充分利用各方案的基础数据信息, 计算各评价方案与最优方案和最劣方案间的距离, 确定各方案与最优方案的相对接近程度, 以此作为评价优劣的依据, 具有计算简单、结果合理的优势。因此, 本文利用熵权-TOPSIS 法, 分别量化准则层均衡度和目标层均衡度, 使得水资源配置空间均衡的评价结果更具客观性和合理性^[32]。

1.4.1 准则层均衡度计算

准则层均衡度评价需基于配置方案集结果确定

指标值, 再利用熵权法分别计算水源均衡度、设施均衡度、单元均衡度和用户均衡度, 计算步骤如下。

(1) 构建标准化评价矩阵。基于多套方案结果的各项指标值构建同一准则层的标准化评价矩阵, 表达式示为

$$X_k = \begin{pmatrix} x_{1,1,k} & x_{1,2,k} & \cdots & x_{1,n,k} \\ x_{2,1,k} & x_{2,2,k} & \cdots & x_{2,n,k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m,1,k} & x_{m,2,k} & \cdots & x_{m,n,k} \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中: $x_{p,q,k}$ ($p = 1, 2, \dots, m; q = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, 3, 4$), 表示方案 p 在第 k 个准则层的第 q 个评价指标; m 为方案总数; n 为该准则层评价指标总数。评价指标有正向指标与负向指标之分, 正向指标具有极大值属性, 负向指标具有极小值属性, 要分别对其指标数据进行标准化处理:

$$r_{p,q,k} = \frac{x_{p,q,k} - x_{q,k,\min}}{x_{q,k,\max} - x_{q,k,\min}} \quad (15)$$

$$r_{p,q,k} = \frac{x_{q,k,\max} - x_{p,q,k}}{x_{q,k,\max} - x_{q,k,\min}} \quad (16)$$

$$R_k = \begin{pmatrix} r_{1,1,k} & r_{1,2,k} & \cdots & r_{1,n,k} \\ r_{2,1,k} & r_{2,2,k} & \cdots & r_{2,n,k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m,1,k} & r_{m,2,k} & \cdots & r_{m,n,k} \end{pmatrix} \quad (17)$$

公式(15)、(16)分别为正向指标与负向指标的标准化处理公式。式中 $x_{q,k,\max}$ 、 $x_{q,k,\min}$ 分别为第 k 个准则层中第 q 项指标的最大值和最小值; $x_{p,q,k}$ 为方案 p 中第 q 项指标在第 k 个准则层的数据; $r_{p,q,k}$ 为方案 p 中第 q 项指标在第 k 个准则层的标准化值, 转化后均为正向属性, 越接近 1 越优, 其他符号意义同上。

(2) 确定指标权重。采用熵权法计算评价指标权重, 计算公式为

$$\omega_{q,k} = \frac{1 - H_{p,k}}{m - \sum_{p=1}^m H_{p,k}} \quad (18)$$

式中: $\omega_{q,k}$ 为第 k 个准则层中各项指标的熵权;

$$H_{p,k} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{q=1}^n f_{p,q,k} \ln f_{p,q,k}, \text{ 称为信息熵; } f_{p,q,k} = \frac{r_{p,q,k}}{\sum_{q=1}^n r_{p,q,k}}, \text{ 称为指标的特征比重。}$$

(3) 计算准则层均衡度。准则层均衡度基于指标标准化值和权重计算, 公式为

$$\theta_{p,k} = \sum_{q=1}^n r_{p,q,k} \omega_{q,k} \quad (19)$$

式中: $\theta_{p,k}$ 为方案 p 在第 k 个准则层的均衡度, 取值范围为 $[0, 1]$; 当 $\theta_{p,k} = 0$ 时, 表示方案 p 在第 k 个准则层

完全不均衡;当 $\theta_{p,k} = 1$ 时,表示方案 p 在第 k 个准则层完全均衡; $r_{p,q,k}$ 为方案 p 在第 k 个准则层中的指标值; $\omega_{q,k}$ 为第 k 个准则层中第 q 项指标的权重。

1.4.2 方案整体均衡度计算

基于准则层均衡度评价价值,利用熵权-TOPSIS法进一步计算方案的水资源配置空间均衡度,评价步骤如下。

(1)构建基于熵权的评价矩阵。基于计算的各项准则层均衡度值,根据公式(18)计算准则层的权重,再建立基于熵权的评价矩阵,计算公式为

$$Y = \begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,3} & y_{1,4} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & y_{2,3} & y_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m,1} & y_{m,2} & y_{m,3} & y_{m,4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{1,1}\omega_1 & \theta_{1,2}\omega_2 & \theta_{1,3}\omega_3 & \theta_{1,4}\omega_4 \\ \theta_{2,1}\omega_1 & \theta_{2,2}\omega_2 & \theta_{2,3}\omega_3 & \theta_{2,4}\omega_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{m,1}\omega_1 & \theta_{m,2}\omega_2 & \theta_{m,3}\omega_3 & \theta_{m,4}\omega_4 \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中: $y_{p,k}$ ($p = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, 3, 4$),表示评价矩阵中,方案 p 在第 k 个准则层的评价指标值; ω_k ($k = 1, 2, 3, 4$)为各准则层的权重,其他符号意义同上。

(2)确定正负理想解。令 Y^+ 表示正理想解,意为第 k 个准则层的指标在所有方案中的最大值; Y^- 表示负理想解,意为第 k 项指标在所有方案中的最小值,计算方法为

$$Y^+ = \{\max_{1 \leq p \leq m} y_{p,k} | p = 1, 2, \dots, m\} = \{y_1^+, y_2^+, y_3^+, y_4^+\} \quad (21)$$

$$Y^- = \{\min_{1 \leq p \leq m} y_{p,k} | p = 1, 2, \dots, m\} = \{y_1^-, y_2^-, y_3^-, y_4^-\} \quad (22)$$

(3)计算距离。采取欧氏距离计算公式,令 D_p^+ 为方案 p 与 y_p^+ 的距离, D_p^- 为方案 p 与 y_p^- 的距离,计算方法为

$$D_p^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (y_p^+ - y_{p,k})^2} \quad (23)$$

$$D_p^- = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (y_p^- - y_{p,k})^2} \quad (24)$$

式中: y_p^+ 和 y_p^- 分别代表第 k 个准则层的最偏好方案值和最不偏好方案值。

(4)评价水资源配置空间均衡度。基于各方案与最理想方案和最不理想方案的距离,计算方案与理想解的相对接近度,并用相对接近度表示方案的水资源配置空间均衡度,相对接近度越大则均衡度越大。计算方法为

$$T_p = \frac{D_p^-}{D_p^+ + D_p^-} \quad (25)$$

式中: T_p 为相对接近度,表示第 p 个方案与理想解的接近程度,取值范围为 $[0, 1]$, T_p 越大,表示该方案的水资源均衡度与理想解越接近。对所有方案的相对接近度进行优劣排序,即可确定最佳的水资源配置空间均衡方案。

2 实例应用

2.1 研究区概况

昌邑市地处山东半岛西北部,渤海莱州湾南岸,介于北纬 $36^\circ 25' \sim 37^\circ 08'$,东经 $119^\circ 13' \sim 119^\circ 37'$,市域面积 $1\,627.5 \text{ km}^2$,属于暖温带半湿润季风气候,多年平均降水量 610 mm ,河流 22 条。昌邑市南部为丘陵,中部为冲洪积平原,北部为冲海积平原,地势南高北低。全市水资源多年平均水资源总量为 1.89 亿 m^3 ,其中地表水天然资源量 $9\,430 \text{ 万 m}^3$,地下水与地表水不重复量为 $9\,521 \text{ 万 m}^3$ 。局部地区地下水开采利用程度过高,形成了地下水漏斗区。北部地区受海水入侵影响,部分乡镇为地下水咸水区,仅能依靠地表水保障农业灌溉。由于本地水资源量不足,通过胶东调水工程引调长江水和黄河水保障城镇用水安全。整体而言,昌邑市水资源供需形势较为紧张,需要优化水资源配置格局保障经济社会用水安全。

2.2 配置模型构建

针对昌邑市水源工程、输水工程、供水区域等进行合理划分与概化,建立了区域内自然水循环及人工供用耗排水关系,作为构建基于规则的水资源配置模拟模型(ROWAS)^[33]的基础。根据昌邑市水源-供水设施-受水区-用水户之间的拓扑关系,共概化了 5 类用水户、 10 个计算单元、 67 个系统节点、 76 条供水渠道、 82 条弃水渠道。以 2030 年作为规划水平年,确定了不同水源的可供水量指标及不同用水户的需水量(表2),并采用 1980 — 2016 年长系列数据进行调节计算。

考虑本地及外调水源,昌邑市的水资源量约为 2.36 亿 m^3 。其中,本地地表水资源量为 $9\,430 \text{ 万 m}^3$,由于修建了一系列闸坝及泵站,本地地表水供水能力约为 $5\,281 \text{ 万 m}^3$;地下水受压采指标限制,可利用的地下水资源量约为 $6\,400 \text{ 万 m}^3$;外调水指标为 $3\,650 \text{ 万 m}^3$,包括引江指标 860 万 m^3 ,引黄指标 $2\,790 \text{ 万 m}^3$ 。峡山水库供水指标约为 $4\,190 \text{ 万 m}^3$,

主要用于化工园区供水(2 190 万 m³)及春灌期间农业灌溉(约 2 000 万 m³)。

表 2 昌邑市水资源配置模型参数

Tab. 2 Parameters of water resources allocation model in Changyi City 单位: 万 m³

水源端		用户端	
水源	可供水量	用户	需水量
本地地表水	5 281	城镇生活	1 704
地下水	6 400	农村生活	555
外调水	3 650	工业	3 878
峡山水库	4 190	农业(多年平均)	12 268
		城镇生态	588
合计	19 521	合计	18 993

根据昌邑市的经济社会发展水平及用水效率变化趋势,预测昌邑市 2030 年总需水量为 18 993 万 m³。其中,农业需水量为 12 268 万 m³,工业需水量为 3 878 万 m³,城镇生活需水量为 1 704 万 m³。比较昌邑市可供水量和需水量,得到可供水量略大于需水量,结合区域分布特征进一步分析可知,昌邑市的水资源供需形势比较严峻。一是受地下水压采、咸水入侵的影响,各乡镇可利用的地下水资源量存在不均衡性;二是地表水资源利用受引提水工程布局的影响,部分区域的水资源保障能力较弱。因此,需要确定合理的水资源配置方案,增加区域之间的水量调配,从而保证供水系统整体的均衡性。

2.3 指标体系构建

根据昌邑市水资源配置系统结构,分别从水源均衡、设施均衡、单元均衡和用户均衡等层面建立了昌邑市水资源配置空间均衡评价指标体系。其中,水源均衡层选取本地地表水、地下水、外调水为评价指标;受资料限制,设施均衡层以城镇水厂作为评价指标,其中地表水净化水厂以外调水为水源,第三水厂及明河水厂以地下水为水源;单元均衡层选取昌邑市下辖 10 个乡镇作为评价指标;用户均衡层选取城镇生活、农村生活、工业、农业、城镇生态作为评价指标。

2.4 配置方案设置

为了分析不同水资源配置情景下的水资源配置空间均衡度,从配置关系调控、水源端调控、需水端调控 3 种调控方式出发,共设置 12 组方案,规划水平年为 2030 年。昌邑市水资源配置方案集见表 3。其中方案 F₀ 为基准方案,按照现状各水源的供水对象、供水范围进行水量分配。

从配置关系调控出发设置方案 R₁、R₂、R₃。其中,方案 R₁ 为本地水源方案,各计算单元仅利用本地水资源量供水,在方案 F₀ 的基础上扣减了现有的外调水源供水;方案 R₂ 为水源置换方案,在方案 F₀ 的基础上将现状以地下水为水源的水厂切换为外调水,同时将置换的地下水用于农业灌溉;方案 R₃ 为扩大外调水供水范围方案,在方案 F₀ 的基础上扩大外调水水厂的供水范围,使其可以向多个单元供水。

表 3 昌邑市水资源配置方案集

Tab. 3 Collection of water resource allocation plans in Changyi City

规划水平年	调控方式	方案序号	方案属性
2030	配置关系调控	F ₀	基准方案,现状供水方式
		R ₁	仅本地水源保障
		R ₂	地下水水源置换
	水源端调控	R ₃	扩大外调水供水范围
		S ₁	外调水指标增加20%
	需水端调控	S ₂	地下水指标增加20%
		D ₁	工业需水减少20%
		D ₂	工业需水增加20%
		D ₃	农业需水减少20%
		D ₄	农业需水增加20%
		D ₅	生活需水减少20%
	D ₆	生活需水增加20%	

从水源端调控出发设置方案 S₁ 和 S₂。其中,方案 S₁ 为外调水指标增加方案,在方案 F₀ 的基础上增加 20% 的外调水指标,同时考虑水源置换;方案 S₂ 为地下水指标增加方案,在方案 F₀ 的基础上增加 20% 的地下水指标。

从需水端调控出发设置方案 D₁ 至 D₆。其中,方案 D₁ 和 D₂ 分别为工业需水减少 20% 和增加 20%,方案 D₃ 和 D₄ 分别为农业需水减少 20% 和增加 20%,方案 D₅ 和 D₆ 分别为生活需水减少 20% 和增加 20%。

2.5 均衡度结果与分析

利用构建的昌邑市水资源配置模型对各方案进行长系列调节计算,得到各计算单元的供需平衡结果和供水设施的水量平衡结果。基于不同环节的水量模拟结果,确定不同水源的供水量、各水厂供水量和不同用水户的用水量等,进一步利用 SPSS 软件计算各方案的空间均衡度,评价结果见表 4。

2.5.1 配置关系调控对水资源配置空间均衡度的影响

比较方案 R₁、R₂、R₃,方案 R₁ 的均衡度最低

(0.281), 方案 R_2 的均衡度最高(0.640), 表明在供水指标不变的情景下, 通过置换水源优化水资源配置格局可以提升水资源配置系统的水资源配置空间均衡度。

表 4 昌邑市水资源配置方案评价结果

Tab. 4 Evaluation form of water resources allocation plan in Changyi City

方案	准则层均衡度				目标层均衡度	排序结果
	水源均衡	设施均衡	单元均衡	用户均衡		
F_0	0.927	0.873	0.512	0.456	0.556	8
R_1	0.000	0.000	0.165	0.510	0.281	12
R_2	1.000	0.873	0.571	0.573	0.640	4
R_3	1.000	0.439	0.657	0.573	0.603	6
S_1	1.000	0.873	0.835	0.800	0.841	1
S_2	0.933	0.873	0.512	0.899	0.776	3
D_1	0.780	0.967	0.629	0.556	0.637	5
D_2	0.996	0.829	0.442	0.280	0.464	10
D_3	0.983	0.873	0.512	1.000	0.800	2
D_4	0.669	0.874	0.513	0.111	0.396	11
D_5	0.867	0.769	0.555	0.549	0.599	7
D_6	0.997	0.991	0.478	0.351	0.520	9
权重	0.191	0.208	0.236	0.365		

水源均衡方面, 方案 R_1 由于只能使用单元本地水源供水, 除外调水源各水源开发利用率均达到上限值, 因此水源均衡性最低。方案 R_2 、 R_3 优化格局, 增加了外调水供水量, 减少了本地地表水的供水量, 不同水源的供给过程更加灵活, 有效增加了水源均衡性。

设施均衡方面, 方案 R_2 采取水源置换措施后, 由于各水厂的供水任务和范围并未改变, 只是将地下水厂切换为外调水, 各水厂的供水量未发生变化, 因此供水设施均衡度不变。方案 R_3 由于扩大了外调水水厂供水范围, 导致外调水水厂的供水量占比增大, 因此增加了供水设施的不均衡性。

单元均衡方面, 方案 R_1 由于人口与本地水资源分布存在差异, 导致单元均衡性最差。例如奎聚街道、都昌街道、围子街道等中心城区人口较多, 而水资源量相对较少, 导致单元的人口占比与水资源量占比之差较大。方案 R_2 、 R_3 通过水资源配置措施增加了区域外调水量, 提升了人口与水资源分布的匹配性, 计算单元的均衡程度也较高。

用户均衡方面, 方案 R_1 各用水户均存在缺水现象, 导致用水户的供水量占比与需水量占比相差不大,

虽然整体缺水严重但均衡程度表现较高。方案 R_2 、 R_3 增加了外调水向城镇用水户的供水量, 并置换出一部分地下水用于农业灌溉, 农业缺水量减少, 从而提升了用户均衡性。因此, 通过水源置换和扩大地表水厂供水范围可以提升配置系统的用户均衡性。

可见, 在现有指标情景下, 通过水源置换、合理调整水厂水源, 可以有效提升水资源配置系统的水资源配置空间均衡度。

2.5.2 水源端调控对水资源配置空间均衡度的影响

比较方案 S_1 、 S_2 , 在水源端增加可供水量指标, 水资源配置空间均衡度总体上高于基准方案 F_0 。

水源均衡方面, 方案 S_1 增加外调水, 将置换的地下水用于农业灌溉, 地下水与外调水供水占比有所提升, 减少了与地表水占比的差距, 因此水源均衡整体提高。方案 S_2 因增加地下水可供水量可直接用于农业灌溉, 增加的地下水供水量得到充分利用, 降低了本地地表水的供水量占比, 减少了地表水的供水量占比与可利用量占比的差值, 因此水源均衡有所提高。

设施均衡方面, 方案 S_1 、 S_2 中居民生活和工业均未出现缺水, 增加水源指标并未改变各水厂的规模、供水范围、供水过程, 因此供水设施均衡度维持不变。

单元均衡方面, 方案 S_1 中外调水可通过水厂设施分配各单元, 提升了各单元的可利用水资源量。而方案 S_2 主要增加了本地地下水供水量, 并未增加计算单元间调配水量, 因此方案 S_1 的单元均衡度高于方案 S_2 。

用户均衡方面, 方案 S_1 新增外调水后置换出的地下水用于农业灌溉, 方案 S_2 则是增加的地下水量可直接用于农业灌溉, 因此方案 S_2 的用水户均衡度提升更为明显。

可见, 在水源端新增可供水量指标可提升水资源配置空间均衡度, 但增加不同的水源指标对配置方案均衡度的影响程度不同。在增加外调水指标的基础上, 同时考虑水源置换, 可有效提升配置方案的整体均衡度。

2.5.3 需水端调控对水资源配置空间均衡度的影响

比较方案 D_1 至 D_6 , 在需水端调整不同用水户的需求, 其中需水量减少方案(D_1 、 D_3 、 D_5)的水资源配置空间均衡度总体上高于需水量增加方案(D_2 、

D₄、D₆)。

水源均衡方面,方案 D₁、D₅ 因工业与居民生活需水量减少,外调水供水量随之减少,但地下水与地表水供水量变化较小,对原有供水格局造成较大的影响,导致水源均衡度有所降低;而方案 D₂、D₆ 因需水量增大,导致外调水与地下水的供水量增大,各水源的供水量均接近于可利用量,因此用水量占比和可利用量占比基本一致,整体水源均衡有所提升。方案 D₃ 减少农业需水导致本地地表水、地下水供水量均减少,其相应的供水量占比与可供水量占比的差值均减小,因此水源均衡提升;方案 D₄ 农业需水量增加,本地地表水的供给量明显增大,导致水源均衡度明显降低。

设施均衡方面,方案 D₃、D₄ 只调整了农业需水量,居民生活和工业的供水量并未改变,各水厂的供水量与现状方案基本一致,因此方案 D₃、D₄ 供水设施均衡不变。现状情景下地下水水厂供水任务中居民生活比重超过工业比重,因此对生活需水量变化对地下水水厂供水占比影响更大;而外调水水

厂任务中工业比重超过居民生活比重,因此,工业需水量变化对地下水水厂供水占比影响更大,见表 5。方案 D₁ 降低工业需水量,外调水水厂供水量占比下降更大,因现状外调水水厂供水量占比与供水规模占比差值较大,外调水水厂供水量占比下降后减少了与其他水厂供水量占比的差距,供水设施均衡性有所提升。反之,方案 D₂ 进一步提升了外调水水厂供水量占比,与供水规模占比差值更大,供水设施均衡性下降。调整居民生活需水量的方案(D₅、D₆),减少居民生活需水量(D₅)地下水水厂占比差值下降幅度较外调水水厂更大,反而增加了供水设施的不均衡性。增加居民生活需水量(D₆),地下水水厂供水量占比和供水规模占比的差值增加幅度更大,提升了各水厂占比差值的接近程度,供水设施均衡性反而提升了。可见,需水端调控对供水设施的均衡性影响比较复杂,并不是需水量减少一定增加供水设施的均衡性,需要基于水资源配置结果的水厂供水任务比重、供水量占比变化幅度等深入分析。

表 5 需水端调控方案水厂供水量对比

Tab. 5 Comparison of water supply volume from various water plants in the demand-side regulation scheme

方案	规模占比/%			供水量/万 m ³									供水量占比/%			占比差值/%		
	地表 水厂	第三 水厂	明河 水厂	地表水厂			第三水厂			明河水厂			地表 水厂	第三 水厂	明河 水厂	地表 水厂	第三 水厂	明河 水厂
				生活	工业	生态	生活	工业	生态	生活	工业	生态						
F ₀	62.5	12.5	25	1459	1725	192	118	74	9	681	39	88	77.0	4.6	18.4	14.5	7.9	6.6
D ₁				1459	1379	192	118	59	9	681	31	88	75.5	4.6	19.9	13	7.9	5.1
D ₂				1459	1999	192	118	88	9	681	41	88	78.1	4.6	17.3	15.6	7.9	7.7
D ₃	62.5	12.5	25	1459	1725	192	118	74	9	681	39	88	77.0	4.6	18.4	14.5	7.9	6.6
D ₄				1459	1725	192	118	74	9	681	39	88	77.0	4.6	18.4	14.5	7.9	6.6
D ₅				1167	1725	192	95	74	9	545	39	88	78.4	4.5	17.1	15.9	8	7.9
D ₆				1714	1725	192	142	74	9	817	39	88	75.6	4.7	19.7	13.1	7.8	5.3

单元均衡方面,方案 D₁、D₅ 整体需水量减少,水资源量在计算单元和用水户之间调配水量的灵活性更高,单元通过调入、调出水资源提升了配置系统的单元均衡度;方案 D₂、D₆ 计算单元需水量增加,水资源在不同用水户、不同单元的竞争关系加剧,导致水资源供给量与人口分布不匹配,配置系统的计算单元均衡性降低。方案 D₃、D₄ 主要影响了本地水资源供水量,并未增加单元的调入、调出水量,因此单元均衡度不变。

用户均衡方面,减少需水量的方案,各用水户的需水更容易满足,因此方案 D₁、D₃、D₅ 的用户均衡度均高于基准方案 F₀。反之,增加需水量的方案中

供水量占比与用水户需水占比的差值进一步增加,因此方案 D₂、D₄、D₆ 的用户均衡度相对较低。

2.5.4 方案整体均衡度分析

根据配置方案整体均衡度的计算结果进行排序,得到 S₁>D₃>S₂>R₂>D₁>R₃>D₅>F₀>D₆>D₂>D₄>R₁, S₁ 均衡度最大(0.841),为最优方案;R₁ 均衡度最小(0.281),为最劣方案。计算结果表明,优化水资源配置格局(R₂)、水源端增加可供水量指标(S₁、S₂)或者在需水端减少需水量(D₁、D₃、D₅)可使水资源配置系统的水资源配置空间均衡度有效提升。

结合配置关系调控准则层均衡度雷达图(图 2)可以看出,方案 R₁ 的水源均衡度与设施均衡度均

为 0, 单元均衡也较小, 因此其水资源配置空间均衡度最低; 方案 R₂ 与方案 R₃ 在水源均衡、单元均衡、用户均衡 3 个准则层均衡度均高于方案 F₀, 方案 R₃ 设施均衡度明显低于方案 F₀, 但设施均衡的权重较低, 因此对目标层均衡度的影响较小。因此方案 R₂ 与方案 R₃ 的水资源配置空间均衡度均高于方案 F₀。

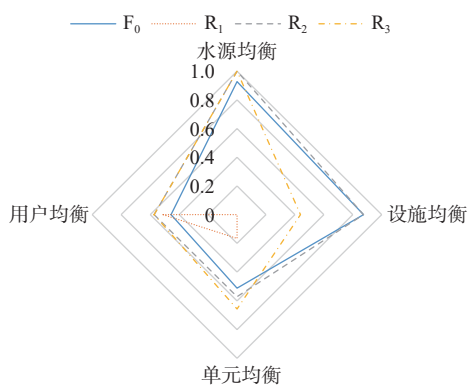


图 2 配置关系调控准则层均衡度雷达图
Fig. 2 Radar chart for adjusting allocation method

结合水源端调控准则层均衡度雷达图(图 3)可以看出, 方案 S₁ 在水源均衡、单元均衡、用户均衡三个准则层均衡度均高于方案 F₀; 方案 S₂ 的设施均衡度、单元均衡度与方案 F₀ 相同, 而其余两个准则层均衡度高于方案 F₀, 因此方案 S₁ 与方案 S₂ 的水资源配置空间均衡度均高于方案 F₀。

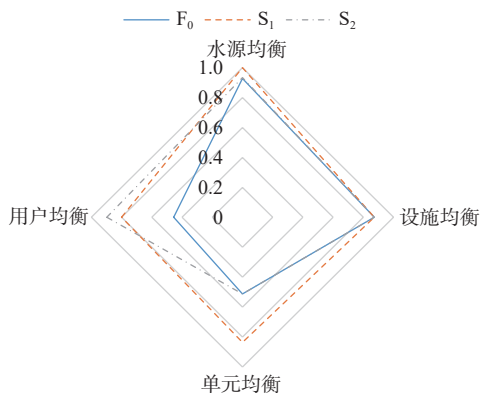


图 3 水源端调控准则层均衡度雷达图
Fig. 3 Radar chart for adjusting water sources

结合需水端调控准则层均衡度雷达图(图 4)可以看出, 方案 D₁ 除水源均衡度低于方案 F₀ 外, 其余准则层均衡度均高于方案 F₀, 方案 D₃ 所有准则层均衡度均不低于方案 F₀, 因此方案 D₁、D₃ 的水资源配置空间均衡度高于方案 F₀。方案 D₅ 的水源均衡度与设施均衡度低于方案 F₀, 单元均衡度与用户均衡度高于方案 F₀, 由于水源均衡与设施均衡的权重较低, 而单元均衡与用户均衡的权重较高, 因此方

案 D₅ 的水资源配置空间均衡度高于方案 F₀。方案 D₂、方案 D₄、方案 D₆ 在水源均衡、设施均衡、单元均衡与方案 F₀ 差距不明显, 而用户均衡度显著低于方案 F₀, 由于用户均衡的权重最大, 因此方案 D₂、方案 D₄、方案 D₆ 的水资源配置空间均衡度均低于方案 F₀。

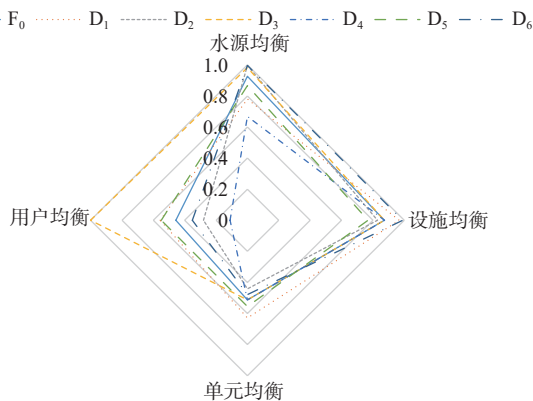


图 4 需水端调控准则层均衡度雷达图
Fig. 4 Radar chart for adjusting demand-side

3 结论

本文将水资源配置与空间均衡程度评价相结合, 从水源均衡、设施均衡、单元均衡和用户均衡 4 个方面分别选取评价指标, 构建了基于水资源配置的空间均衡度评价指标体系, 并提出了基于熵权-TOPSIS 法的水资源配置空间均衡度计算方法。该方法不仅可以量化水资源配置系统整体的水资源配置空间均衡度, 还可以从水源均衡、设施均衡、单元均衡和用户均衡等方面分别针对不同调控措施的影响效果进行深入分析。

选取昌邑市为研究区, 对昌邑市 2030 规划水平年的 12 种水资源配置方案进行了水资源配置空间均衡度评价。计算结果表明, 为了提高昌邑市整体的水资源配置空间均衡度, 在配置关系调控方面可采取水源置换措施, 增加外调水向城镇用水户的供水量, 并将置换的地下水量用于农业灌溉; 水源端调控方面, 需结合水源与用水户之间的关系确定增加水源指标的方向。在增加外调水指标的基础上, 同时考虑水源置换, 可有效提升配置方案的整体均衡度; 需水端调控方面, 可通过减少用户需水, 增加水资源在不同用水户和不同单元间调配的灵活性, 可有效提升水资源配置空间均衡度。本文提出了水资源配置空间均衡度评价方法, 基于水源-供水设施-受水区-用水户的水资源配置系统链条建立评价

体系。实例验证表明,该方法能够量化不同配置情景下的水资源配置空间均衡度,丰富了水资源配置空间均衡度的研究思路,可为区域水资源供需调控提供决策支撑。

受限于现有资料条件,供水能力和用水需求预测存在不确定性,后续研究中可基于不同水源工程可供水量和经济社会指标变化趋势等,增加水源端、需求端不同调控比例的情景方案比选分析。同时,由于权重对方案整体的水资源配置空间均衡度影响较大,因此需要进一步开展权重对评价结果的影响,深入分析水资源配置均衡程度评价方法的有效性。

参考文献:

- [1] 左其亭,韩春辉,马军霞,等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 113-118. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.10.020.
- [2] 郦建强,王平,郭旭宁,等. 水资源空间均衡要义及基本特征研究[J]. *水利规划与设计*, 2019(10): 1-5,23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2019.10.001.
- [3] 郦建强,王平,何君,等. 水资源空间均衡理论方法与对策措施研究[J]. *中国水利*, 2019(23): 23-25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2019.23.014.
- [4] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 33-44. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.004.
- [5] 左其亭,纪瓔芯,韩春辉,等. 基于GIS分析的水资源分布空间均衡计算方法及应用[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(6): 33-36.
- [6] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.001.
- [7] 缪昭旺,吴成国,崔毅,等. 水资源空间均衡评价的联系数-耦合协调度模型及应用[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(03): 86-95. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2021039.
- [8] YANG Y F, WANG H R, WANG C, et al. Coupling Variable Fuzzy Sets and Gini Coefficient to evaluate the spatial equilibrium of water resources[J]. *Water Resources*, 2022, 49(2): 292-300. DOI: 10.1134/S0097807822020154.
- [9] LU Y, YANG X H, Bian D H, et al. A novel approach for quantifying water resource spatial equilibrium based on the regional evaluation, spatiotemporal heterogeneity and geodetector analysis integrated model[J]. *Journal of cleaner production*, 2023, 424: 138791.1-138791.14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138791.
- [10] ZHAO Z Y, CAI Y H, YANG Y F. Construction and application of a water resources spatial equilibrium model: A case study in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Water*, 2023, 15(16): 2984. DOI: 10.3390/w15162984.
- [11] 马睿,李云玲,贾冬冬,等. 基于多指标的黄河流域空间均衡状态评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(02): 217-225+236. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0023.
- [12] 杨亚锋,高媛媛,许新宜,等. 水资源生态安全的时空分异特征:以南水北调东线山东段为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 833-841. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0084.
- [13] 杨亚锋,闫佳伟,王红瑞,等. 长江经济带水环境承载力时空变化特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 714-723. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0073.
- [14] 杨才杰,王贺龙,温进化,等. 基于IA-PSO的库坝梯级系统水资源优化配置与调度[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 60-68. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.005.
- [15] 左其亭,韩春辉,马军霞. 水资源空间均衡理论应用规则和量化方法[J]. *水利水运工程学报*, 2019(6): 50-58. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.
- [16] 樊红梅,刘晓民,刘廷玺,等. 基于空间均衡的水资源合理配置研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 61-67. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.02.08.
- [17] FENG J H. Optimal allocation of regional water resources based on multi-objective dynamic equilibrium strategy[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 90: 1183-1203. DOI: 10.1016/j.apm.2020.10.027.
- [18] DONG Z C, ZHANG J T, ZHANG K, et al. Multi-objective optimal water resources allocation in the middle and upper reaches of the Huaihe River basin (China) based on equilibrium theory[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 6606. DOI: 10.1038/s41598-022-10599-w.
- [19] 龚艳冰,巢妍. 基于模糊组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. *统计与决策*, 2021, 37(13): 179-183. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyj.2021.13.042.
- [20] 卢瑶,马真臻,贺华翔,等. 基于缺水量与保证率“双控”的水资源优化配置模型及应用[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 91-103. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.008.
- [21] 邵莉. 基于博弈论的TOPSIS模型的水资源配置方案综合评价[J]. *黄河水利职业技术学院学报*, 2023, 35(3): 1-6. DOI: 10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2023.

- 03.001.
- [22] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.008.
- [23] 杨丹. 某县水资源优化配置研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2021.000180.
- [24] 张玉祥, 穆振侠, 田晓杰. 基于CNSGA-III算法的乌苏市水资源优化配置[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(32): 13758-13764. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2023.23.32.13758.
- [25] WANG H, MEI Z M. Research on the evaluation model of multi-objective optimal allocation of water resources in Guizhou Province[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 914(1): 012018 (6pp). DOI: 10.1088/1757-899X/914/1/012018.
- [26] HONG X J, GUO S L, WANG L, et al. Evaluating water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin based on an integrated optimal water resources allocation model[J]. *Water*, 2016, 8(9): 364. DOI: 10.3390/w8090364.
- [27] 朱彩琳, 董增川, 李冰. 面向空间均衡的水资源优化配置研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(10): 64-68. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2018.10.013.
- [28] 吴强, 高龙, 李森. 空间均衡: 必须树立人口经济与资源环境相均衡的原则[J]. *水利发展研究*, 2018, 18(9): 17-24. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2018.09.003.
- [29] 金菊良, 酆建强, 吴成国, 等. 水资源空间均衡研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 47-60. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2019081.
- [30] 郝奇琛, 孙倩, 李亚松, 等. 厦门市多水源多目标联合配置研究[J]. *华东地质*, 2022, 43(1): 79-86. DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.01.008.
- [31] 敬莉, 王宇. 人口与产业空间分布的匹配性探析: 基于新疆区域差异视角[J]. *新疆财经*, 2018(2): 62-71. DOI: 10.16716/j.cnki.65-1030/f.2018.02.008.
- [32] 魏敏, 李书昊. 新时代中国经济高质量发展水平的测度研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2018, 35(11): 3-20. DOI: 10.13653/j.cnki.jqte.2018.11.001.
- [33] 游进军, 甘泓, 王浩, 等. 基于规则的水资源系统模拟[J]. *水利学报*, 2005(9): 1043-1049, 1056. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.09.004.

Evaluation method for spatial balance based on water resource allocation

LI Jiale^{1,2}, LIN Pengfei², LI Yanbin¹, YOU Jinjun², FU Min²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The uneven spatiotemporal distribution of water resources has gradually become a significant constraining factor for regional development, due to mismatches with population, productivity, and land layout. In order to meet the demands of human socioeconomic development, a series of hydraulic engineering and water supply facilities have been constructed to alter the natural distribution pattern of water resources and enhance the spatial equilibrium of water resource allocation. Water resource equilibrium allocation is not simply a matter of allocating a single water source to a single user, but involves complex water quantity distribution composed of multiple water sources, users, and hierarchical engineering. Therefore, it is essential to analyze the spatial equilibrium of water allocation from the perspective of the overall water allocation system.

An evaluation index system has been established, consisting of four subsystems: water source equilibrium, water supply facility equilibrium, unit equilibrium, and user equilibrium. The water source equilibrium subsystem employs the matching degree between the water supply proportion of each water source and its available water quantity proportion as an indicator. The water supply facility equilibrium subsystem selects the matching degree between the water supply proportion of each water supply facility and the scale of water supply as an indicator. The unit equilibrium subsystem treats each administrative region as a computational unit and utilizes the matching degree between the population of each unit and the water resources as an indicator. The user equilibrium subsystem uses the matching degree between the water supply proportion of each water user and the demand for water as an indicator. Subsequently, 12 different scenarios are designed, and the entropy weight TOPSIS method is utilized to comprehensively evaluate the spatial equilibrium level of water resources. The entropy weight TOPSIS method is an effective multi-attribute decision-making analysis approach that fully considers the importance of each attribute,

thereby enhancing the accuracy and reliability of decision-making by avoiding subjectivity and uncertainty. In practical applications, it is necessary to select appropriate methods based on specific circumstances and pay attention to data quality and standardization.

The results indicate that the scheme involving external water diversion is the optimal solution, with a relative closeness degree of 0.841, while the scheme without water resource allocation is the worst, with a relative closeness degree of 0.281. Regarding the adjustment of allocation methods, in the scheme without water resource allocation, the inability to conduct inter-basin water transfer and the widespread inadequacy of local water resources to meet demands lead to a 0.275 decrease in relative closeness compared to the existing situation. The scheme involving water source substitution exhibits an increase of 0.084 in relative closeness, and the scheme expanding the water supply range of water plants shows an increase of 0.047 in relative closeness compared to the existing situation. In terms of adjusting water sources, the scheme increasing the index of external water diversion demonstrates an increase of 0.285 in relative closeness compared to the existing situation, while the scheme increasing the index of groundwater shows an increase of 0.220 in relative closeness. It is evident that the effect of increasing the index of external water diversion is more significant. In terms of adjusting water demand, reducing water demand can improve the spatial equilibrium of water resources, while increasing water demand can lower it. The reduction of agricultural water demand yields the best effect, followed by the reduction of industrial water demand, and finally the reduction of domestic water demand, with relative closeness degrees increasing by 0.244, 0.081, and 0.043, respectively, compared to the existing scheme.

This method combines water resource allocation with spatial equilibrium evaluation and utilizes the entropy weight TOPSIS method to comprehensively assess the spatial equilibrium level of different schemes based on 12 allocation scenarios in Changyi City. This approach ensures that the results are more rational and objective, while also providing reference for future water resource allocation work in Changyi City.

Key words: water resources allocation; spatial equilibrium; Entropy weight; TOPSIS method; Changyi City

