

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.006

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. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia. Application rules and quantification methods of water resources spatial equilibrium theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 50-58. (in Chinese))

# 水资源空间均衡理论应用规则和量化方法

左其亭<sup>1,2</sup>, 韩春辉<sup>1</sup>, 马军霞<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 空间均衡是新时期水利发展的重要导向, 是水利工作开展所需要遵循的基本要求。如何实现水资源空间均衡管控是水利发展的重要内容和挑战。在前期水资源空间均衡理论方法及应用框架研究的基础上, 阐述了水资源空间均衡的理论需求及基本原理, 以回答“为什么要实施水资源空间均衡?”; 介绍了水资源空间均衡的理论体系框架与主要内容, 以回答“水资源空间均衡理论是什么?”; 提出了水资源空间均衡理论的应用规则和量化方法, 以回答“水资源空间均衡理论如何应用?”。其应用规则包括遵循三大规律、符合三条原则、承担四项任务、具备三大功能, 是正确应用水资源空间均衡理论的守则。其量化方法包括水资源空间均衡判别准则量化、水资源空间均衡度计算、水资源空间均衡优化模型、水资源空间均衡规划方法、水资源空间均衡预警评价与综合调控。研究认为, 水资源空间均衡理论是指导区域或流域水利乃至综合空间均衡发展的一个重要支撑, 为完善水资源空间均衡理论、落实空间均衡管控提供了解决途径和具体方法。

**关键词:** 水资源空间均衡; 理论体系; 应用规则; 量化方法; 空间均衡

**中图分类号:** TV213      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2019)06-0050-09

水资源开发与保护历来都是水利事业的重要环节, 直接关系到经济社会发展、生态环境保护的协调与可持续发展。然而, 水资源空间分布不均, 与经济社会发展、生态环境保护的不相协调, 以及愈加增大的用水需求等问题, 对水资源空间均衡管控提出了更高的要求。而如何贯彻水资源“空间均衡”理念并在实践中“落地”, 则必须要有相应的理论方法作为支撑, 并将理论用以指导实践。

“空间均衡”其实并不是水利行业的专有名词, 很多领域都有所应用, 研究内容主要涉及土地利用<sup>[1-3]</sup>、产业经济<sup>[4-5]</sup>、旅游海运<sup>[6-7]</sup>、医疗健康<sup>[8-9]</sup>等方面, 而水资源空间均衡的研究仅占其中极少的一部分, 以中文研究居多, 且定性研究占大多数, 如卢胜芳探讨了推动“空间均衡”在调水管理中的应用<sup>[10]</sup>; 王晶<sup>[11]</sup>、唐克旺<sup>[12]</sup>、方子杰等<sup>[13]</sup>分别对“空间均衡”治水新方略发表了各自见解; 吴强等在系统论述水资源空间均衡实施意义的基础上, 提出了空间均衡的内容、范畴、方向和标准<sup>[14]</sup>。在定量研究方面, 有借鉴已有方法的<sup>[15]</sup>, 有仅针对降水空间分析的<sup>[16-17]</sup>, 还有将“空间均衡”理念引入到配置优化模型的<sup>[18-19]</sup>。综上所述, 一方面对水资源空间均衡的研究目前多数还停留在讨论当中, 到底为什么推进水资源空间均衡、能解决什么问题、如何定量研究和具体应用等问题, 仍未解决; 另一方面是缺乏系统和深入的研究去揭示水资源空间均衡的本质并提供具体的解决途径, 这需要上升到理论方法研究的层面。文献[20]中初步提出了水资源空间均衡理论方法及应用研究框架, 但没有深入探讨理论的具体应用规则及量化研究方法。

针对以上问题, 本文在前期工作的基础上, 进一步开展水资源空间均衡理论的应用规则及量化方法研究, 助力于水资源空间均衡的理论推广与应用实践。

收稿日期: 2019-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779230, U1803241)

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源专业。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

# 1 水资源空间均衡的理论需求及基本原理

## 1.1 理论需求

(1) 是水利创新发展的需要。水资源空间均衡是新时期治水理念之一,是应对我国越来越复杂的人水关系和严重水问题的一个新的举措,起到引领水利发展,谋划水利未来的作用。

(2) 是增强水利整体性、协调性的需要。协调发展是主旋律也是国之根本,我国水资源尚存很多短板,空间发展也很不平衡,急需用水资源空间均衡理论来指导水资源开发与保护的总体布局,优化河湖水网,实现水资源与经济社会和生态环境均衡发展。

(3) 是推进人与自然和谐共生的需要。与自然和谐共处历来都是水利事业所遵循的宗旨,水资源空间均衡就是要做到水资源与经济社会、生态环境的和谐共处,达到空间均衡的状态。

(4) 是水利对外合作开放、实现互惠共享的需要。水资源空间均衡同样也是我国对外水资源合作开发与保护的一种大国治水观念,对于开展国际水资源合作,实现水利互惠共享,特别是支撑“一带一路”水资源空间均衡发展意义重大。

## 1.2 基本原理

水资源系统、经济社会系统、生态环境系统以水循环为纽带被紧密地连接在一起,共同构成了一个复杂的巨系统。天然状态下影响水资源空间分布的因素有很多,如地形地貌、气候条件、降水特征、地理位置等,水资源空间分布基本上都是不均衡的。人类尝试通过对水资源的开发与保护进行科学管控来满足经济社会发展和生态环境保护对水资源的需求。一方面,通过对水资源的开发,改变区域水资源的天然空间分布。形成的水资源承载力和水环境承载力格局以供给侧的身份对水资源的利用与保护需求形成制约,即限制了经济社会的空间布局和生态环境的空间功能;另一方面,水资源的利用与保护,一个侧重经济社会的发展,一个侧重良好的生态环境,二者均是水资源的需求侧,是竞争性用水关系,因此发展的目标需要又对水资源承载力和水环境承载力形成反向需求,即对水资源的开发提出要求。为了保障良性水循环,满足空间上水资源和水环境可承载,实现水资源、经济社会和生态环境的供需平衡关系,在空间上水资源的开发与保护应呈现一种平衡状态,这就是水资源空间均衡<sup>[20]</sup>。具体来说,水资源空间均衡是水资源空间分布、经济社会空间布局、生态环境空间功能所呈现的一种平衡状态。

# 2 水资源空间均衡理论体系框架及主要内容

## 2.1 理论体系框架

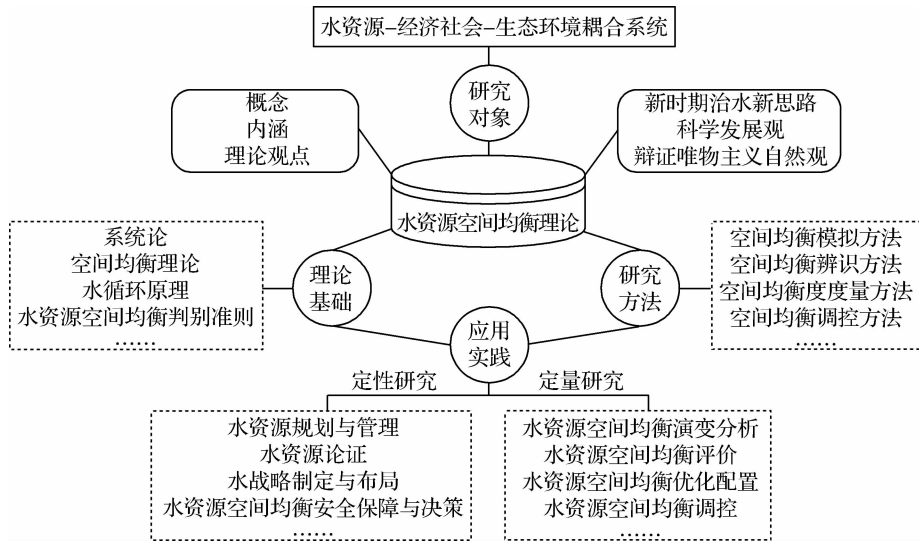
为了进一步揭示水资源空间均衡原理,满足水资源空间均衡研究和应用的需求,需要构建一套具有指导作用的水资源空间均衡理论体系。笔者在文献[20]中构建了以“研究对象、理论基础、研究方法以及应用实践”四方面为核心的水资源空间均衡理论体系框架,如图1所示。

## 2.2 主要内容

(1) 研究对象:水资源-经济社会-生态环境耦合系统。

(2) 概念:指在空间上水资源开发与保护的一种相对稳定的平衡状态。

(3) 内涵:① 从空间上看问题,重点解决空间关系问题;② 空间均衡状态是所有空间均衡行为的集合;③ 空间均衡具有不同的空间范围和层次;④ 空间均衡是相对的,不均衡是绝对的;⑤ 空间均衡是动态转移的,最优水资源空间均衡是其一种特例;⑥ 理性看待空间均衡状态的转移。

图1 水资源空间均衡理论体系框架<sup>[20]</sup>Fig. 1 Theoretical framework of water resources spatial equilibrium<sup>[20]</sup>

(4) 理论观点:① 确定水资源空间均衡的研究范畴,要兼顾局部与整体、宏观与微观研究;② 客观面对空间差异性,分析辨识水资源开发与保护,正面影响与负面影响,作用与反作用,供给侧与需求侧的关系,正确认识水资源空间均衡的平衡转移;③ 不仅要遵从水资源和生态环境的自然规律,同时还要兼顾经济社会的发展规律;④ 以现有的理论基础和研究方法为支撑,深入开展水资源空间均衡的理论创新与方法研发;⑤ 需要多学科交叉以及一定的技术和政策支持;⑥ 现有的治水工作均可以采用水资源空间均衡理论的思想。

(5) 理论基础:包括研究系统问题的系统论、研究水资源问题的水循环原理、研究空间均衡转移的和谐平衡理论、研究量化问题的水资源空间均衡判别准则等。

(6) 研究方法:包括水资源空间均衡判别准则量化方法、水资源空间均衡度计算方法、水资源空间均衡模拟模型、水资源空间均衡规划方法、水资源空间均衡评价与调控方法。

(7) 应用实践:定性方面,水资源规划与管理、水资源论证、水战略制定与布局、水资源空间均衡安全保障与决策;定量方面,水资源空间均衡演变分析、水资源空间均衡评价、水资源空间均衡系统模拟与优化、水资源空间均衡调控。

### 3 水资源空间均衡理论的应用规则

根据上文所述,水资源空间均衡并不是某一方面被动去均衡的问题,而是需要从系统整体的角度做出调整并寻找平衡点。因此,在应用水资源空间均衡理论来研究水资源空间均衡调控方案时,必须遵循一定的应用规则。水资源空间均衡理论应用规则框架如图2所示。

#### 3.1 遵循三大规律

(1) 遵循水资源自然分布规律 天然状态下水资源在空间上的分布本身就是不均匀的,有些地方水多,有些地方水少,可能会带来洪涝、干旱等灾害,这是水资源的自然规律。因此,要遵循水资源的自然分布规律,针对不同地区的水资源特点和状况,采取合适的治水措施。比如,对水少的地区,可在一定限度内采取拦控空中水、过境水、优化地表地下水、调入水等措施;对水多的地区,可采取疏导洪水、优化水网、调出水等措施。

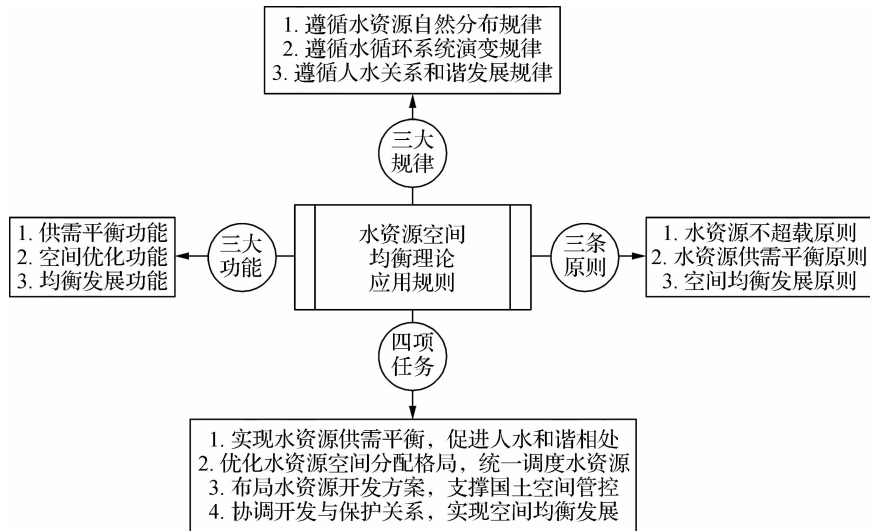


图2 水资源空间均衡理论应用规则

Fig. 2 Application rules of water resources spatial equilibrium theory

(2) 遵循水循环系统演变规律 水资源具有自然和社会双重属性,自然属性具有更新水资源、净化环境与维持生态系统完整的功能,社会属性具有供水、生产、发电、景观娱乐等功能。这些功能的正常发挥代表了水循环的稳定状态,哪一方面的破坏或改变都会对水循环过程产生影响。因此,水资源空间均衡要遵循水循环演变规律,科学分析和认识水资源开发与保护的变化过程和演变趋势。

(3) 遵循人水关系和谐发展规律 人与自然和谐相处是中国自古以来就主张的对待自然的伦理观念。人水关系在经历了漫长历史演变和发展后,丰富的治水经验表明人水和谐发展是唯一出路,只有走和谐的道路,人水之间才能实现共赢。因此,水资源空间均衡要遵循人水关系和谐发展规律,助力人水关系向着和谐的方向发展。

### 3.2 符合三条原则

(1) 水资源不超载原则 在一定空间和时间,可再生的水资源量是有限的,能够承载的经济社会和生态环境规模也是有限的,如果不加限制地开发利用水资源而超过了水资源的承载能力,则会带来一系列环境和生态问题。因此,在水资源空间均衡管控中首先要保证水资源不超载。

(2) 水资源供需平衡原则 水资源供需涉及经济社会、生态环境各个方面,无论是从供给侧还是需求侧来看,牵涉面都非常广且复杂,因此,一个地区水资源供需是否平衡关系到该地区的健康发展与稳定。因此,水资源空间均衡要严格遵循供需平衡的原则,确保人水关系和谐稳定。

(3) 空间均衡发展原则 水资源不单单要实现自己本身的空间均衡或者支撑某一个地区的空间均衡,而且还要实现系统整体与区域整体的综合空间均衡发展。因此,在水资源开发与保护的各个环节都要牢牢把握空间均衡发展的原则。

### 3.3 承担四项任务

(1) 实现水资源供需平衡,促进人水和谐相处 水资源空间均衡的目标就是要通过合理的优化水资源供需关系来解决供需不平衡问题,减少人水矛盾,促进人水和谐共生。

(2) 优化水资源空间分配格局,统一调度水资源 在水资源空间均衡管控中,要统筹优化水资源开发利用总体布局,优化空间分配方案,强化水资源的统一调度,实现水资源、经济社会和生态环境空间均衡发展。

(3) 布局水资源开发方案,支撑国土空间管控 按照“多规合一”的要求,水资源开发与保护的布局应为国土空间管控提供支撑。国土空间包括生产空间、生活空间、生态空间等多个方面,需要做到多方面的空间均衡发展,在划定水生态空间范围、优化河湖连通、布局水利基础设施网络时要体现空间均衡的发展

思路。

(4) 协调开发与保护关系,实现空间均衡发展 开发与保护既相互依存又相互矛盾,不能不开发又不能开发过度,需要合理地开发利用水资源,协调好水资源开发与保护之间的关系,寻找其平衡点。水资源空间均衡就是研究空间上水资源开发与保护的一种平衡状态,可以起到促进水资源、经济社会和生态环境空间均衡发展的作用。

### 3.4 具备三大功能

(1) 供需平衡功能 水资源空间均衡致力于实现水资源开发与保护在空间上达到一种相对稳定的平衡状态,其中水资源供需关系的平衡是其最基本的功能要求,也是水资源空间均衡优化的前提条件。

(2) 空间优化功能 水资源空间均衡是对水资源的空间分布、经济社会的空间格局、生态环境的空间功能提出的空间上平衡关系的功能要求,具有空间优化功能。

(3) 均衡发展功能 中共十八大之后,我国的发展战略由不均衡发展转向均衡发展,水利也由之前的不均匀、不匹配转向人口-资源-环境相均衡、协调发展。水资源空间均衡理论就是为了解决均衡发展的一系列问题所提出来的现代水资源管理理念,具有促进均衡发展功能。

## 4 水资源空间均衡量化方法

水资源空间均衡可以从3个层次进行研究:一是,仅考虑水资源系统本身的空间均衡,即水资源分布的空间均衡,比如,降水或水资源量在空间上的均衡分布状态,可用于分析水资源的空间分布差异;二是,2个系统之间(水资源系统-经济社会系统;水资源系统-生态环境系统),即水资源供需的空间均衡,是水资源供给侧与需求侧的空间均衡,可用于研究供需因子的空间匹配与协调关系;三是,3个系统之间(水资源系统-经济社会系统-生态环境系统),即水资源调配格局的空间均衡,可以理解为是与水资源相关的所有因子间的空间均衡,可用于研究整个系统的空间均衡结构组合与优化。

按照以上对水资源空间均衡理论的理解,考虑到现实所要解决的问题,可以将水资源空间均衡的量化研究分为水资源空间均衡判别准则量化、水资源空间均衡度计算、水资源空间均衡优化模型、水资源空间均衡规划方法、水资源空间均衡预警评价与综合调控五大方面,如图3所示。

### 4.1 水资源空间均衡判别准则及量化

如何从定量角度对水资源空间均衡进行判别,还需要给出一套可度量的判别标准。目前可行的解决方案有:①从水资源空间均衡机理,寻求表征水资源空间均衡判别准则,再由空间均衡系数方程对代表性指标进行量化,如文献[17]中针对水资源空间分布所提出的空间均衡系数计算方法,见式(1);②参考和借鉴其他相似理论的准则量化方法,比如,可持续发展、人水和谐等。

$$C_{se} = \begin{cases} 0 & (x_i < \bar{x}_i - \Delta x_{i1}) \\ (x_i - \bar{x}_i + \Delta x_{i1}) / \Delta x_{i1} & (x_i \in [\bar{x}_i - \Delta x_{i1}, \bar{x}_i]) \\ (\bar{x}_i + \Delta x_{i2} - x_i) / \Delta x_{i2} & (x_i \in [\bar{x}_i, \bar{x}_i + \Delta x_{i2}]) \\ 0 & (x_i > \bar{x}_i + \Delta x_{i2}) \end{cases} \quad (1)$$

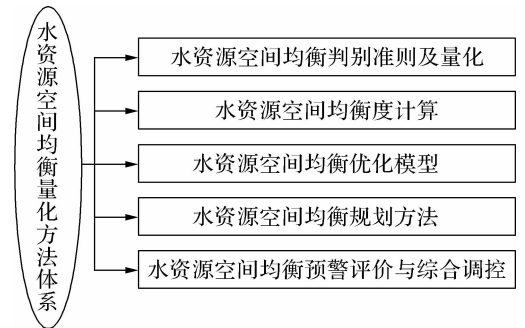


图3 水资源空间均衡量化方法体系

Fig.3 Quantitative method system of water resources spatial equilibrium

式中: $C_{se}$ 为空间均衡系数; $x_i$ 为第*i*个空间点或空间单元的特征指标值; $\bar{x}_i$ 为均衡系数为1时的特征指标值; $\bar{x}_i - \Delta x_{i1}$ 和 $\bar{x}_i + \Delta x_{i2}$ 分别为特征值小于和大于 $\bar{x}_i$ 、均衡系数为0时的临界点。

#### 4.2 水资源空间均衡度计算

为了定量评估水资源空间均衡水平的高低,需要研究水资源空间均衡程度计算方法。有两种途径:①根据水资源空间均衡判别准则,构建评估指标体系,开展综合评价,如采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”的方法<sup>[21]</sup>;②研究水资源空间均衡度的计算方程,如文献[17]中针对均匀分布和不均匀分布提出的空间均衡度计算方法,见式(2)和(3)。

$$D_{GSE} = \left( \sum_{i=1}^N C_{se,i} \right) / N \quad (2)$$

$$D_{GSE} = \sum_{i=1}^N (S_i \times C_{se,i}) / \sum_{i=1}^N S_i \quad (3)$$

式中: $D_{GSE}$ 为总体空间均衡度; $N$ 为空间点或空间单元的总数; $C_{se,i}$ 为第*i*个空间点或空间单元的空间均衡系数; $S_i$ 为第*i*个空间点辐射范围的面积。

#### 4.3 水资源空间均衡优化模型

水资源空间均衡的内在表现是水资源-经济社会-生态环境系统的相互作用,外在表现则是水资源开发与保护的平衡关系,水资源空间均衡的演变过程实际上就是空间平衡点的转移,为了获得最优的水资源空间均衡优化方案,这就需要构建基于和谐平衡的水资源空间均衡模拟模型。该问题的可行解决方法:将水资源空间均衡作为约束条件或目标函数引入到现有的水资源优化配置模拟模型中。

比如,在目标函数中,以不同计算单元之间的空间均衡度最大作为空间均衡目标函数,即:

$$\text{Max}f(Q) = \text{Max}(D_{se,i}) \quad (4)$$

式中: $D_{se,i}$ 为不同计算单元*i*之间的水资源空间均衡度。

再比如,在约束条件中以本文提出的水资源空间均衡三大原则作为判别准则,分别设立目标函数(可承载约束、供需平衡约束、空间均衡约束):

$$CC_{ij} \geq CC_{ij0} \quad (5)$$

$$WS_i = WD_i \quad (6)$$

$$D_{se,i} \geq D_{se,0} \quad (7)$$

式中: $CC_{ij}$ 为不同计算单元*i*的不同类型*j*(水资源、水环境)承载能力; $CC_{ij0}$ 为承载能力下限; $WS_i$ 为供给侧; $WD_i$ 为需求侧; $D_{se,0}$ 为水资源空间均衡度下限。

#### 4.4 水资源空间均衡规划方法

水资源规划是在了解水资源时空分布特征及条件、水资源供需形势的基础上,对水资源进行统一规划与安排,制定出最佳水资源开发与保护方案。但是目前考虑水资源空间均衡的规划方法还不成熟。该问题的可行解决方案:深入贯彻新时期水利治水方针,将水资源空间均衡的理论思想引入到水资源规划的编制中,进一步优化和调整水资源中长期配置的总体格局。具体应用思路可在一般水资源空间均衡优化模型中,加入规划时段*T*,即在某一特定时段*T*,在满足一定约束条件下,使总空间均衡度达到最大,同时嵌入水资源空间均衡的研究对象“水资源-经济社会-生态环境耦合系统”模型 SubMod(*WR, SE, EE*),作为其一个约束条件,还可视情况增加其他一些约束条件,得到规模模型:

$$\text{目标函数:} \quad \text{Max}(D_{se}) \quad (8)$$

约束条件:

$$\begin{cases} CC_{ij}(T) \geq CC_{i0}, T \geq T_1 \\ WS_i(T) \geq WD_{i0}, T \geq T_1 \\ D_{se,2}(T) \geq D_{se,i0}, T \geq T_1 \\ \text{SubMod}(WR, SE, EE) \\ \text{其他约束} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $CC_{ij}(T)$ ,  $WS_i(T)$ ,  $D_{se,i}(T)$  分别为不同计算单元的可承载力、水资源供给能力、水资源空间均衡水平;  $CC_{i0}$ ,  $WD_{i0}$ ,  $D_{se,i0}$  为不同计算单元相应指数的下限值;  $T$  为规划期(年);  $T_1$  为规划的某基准年;  $\text{SubMod}(WR, SE, EE)$  为水资源-经济生活-生态环境耦合系统子模型。

#### 4.5 水资源空间均衡预警评价与综合调控

水资源空间均衡是一个动态的变化过程,涉及的因素众多,为了及时获取水资源空间均衡的动态特征并精准调控,需要提前构建水资源空间均衡预警系统,研究预警评价方法,开发水资源空间均衡综合调控模拟软件嵌入到预警系统中,以实现水资源空间均衡向着和谐的目标发展。该问题的解决途径:借鉴现有的预警平台建设经验,构建水资源空间均衡预警评价指标体系,可按照空间均衡准则对指标进行选取,并确定阈值,选择预警评价方法,如引入结合了单因子评价和综合评价的和谐度方程评价方法<sup>[21]</sup>,评价水资源空间均衡级别状态,进行报警,同时研发配套的水资源空间均衡综合调控模型方法,比如,可采用和谐调控方法<sup>[22]</sup>。

## 5 结 语

本文在前期开展的水资源空间均衡理论方法及应用研究框架的基础上,解释了水资源空间均衡的理论需求与基本原理,介绍了水资源空间均衡理论体系框架,提出了水资源空间均衡理论的应用规则和量化方法,回答了为什么要水资源空间均衡?水资源空间均衡理论是什么?水资源空间均衡理论具体如何应用等问题。分析认为:(1)水资源空间均衡是水利创新发展、增强水利整体性协调性、推进人与自然和谐共生、水利对外合作开放、实现互惠共享的需要;(2)应用水资源空间均衡应遵循“三大规律和三条原则”,这是判断水资源空间是否均衡的依据;(3)水资源空间均衡应承担“四项任务”,具备“三大功能”,这是水资源空间均衡的应用目标与价值;(4)水资源空间均衡量化方法应包含:水资源空间均衡判别准则量化、水资源空间均衡度计算、水资源空间均衡优化模型;水资源空间均衡规划方法、水资源空间均衡预警评价与综合调控,是一个完整的方法体系。实现理论的具体应用,这将是下一步研究的重点。

本文是对水资源空间均衡理论应用研究的初步观点及试探性讨论,仅给出了定性研究思路与方向,还没有开展具体的实例应用,后续会在进一步丰富理论研究的基础上,开展量化的实例应用工作,期待广大学者在更多的理论研究和应用实践中共同做出贡献。

#### 参 考 文 献:

- [1] 卞凤鸣,刘彦彤,赵玲. 吉林省土地利用空间均衡度评价研究[J]. 中国土地科学, 2015, 29(12): 74-80. (BIAN Fengming, LIU Yantong, ZHAO Ling. The spatial balance degree evaluation on land use in Jilin province[J]. China Land Sciences, 2015, 29(12): 74-80. (in Chinese))
- [2] 陈逸,黄贤金,陈志刚,等. 中国各省域建设用地开发空间均衡度评价研究[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1424-1429. (CHEN Yi, HUANG Xianjin, CHEN Zhigang, et al. The spatial balance degree evaluation of construction land in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1424-1429. (in Chinese))
- [3] JIN Y, DENMAN S, DENG D, et al. Environmental impacts of transformative land use and transport developments in the Greater Beijing Region: insights from a new dynamic spatial equilibrium model[J]. Transportation Research Part D: Transport and

Environment, 2017, 52: 548-561.

- [4] 乔彬, 张圣, 吉琳. 政府行为、产业聚散与产业空间均衡[J]. 经济问题, 2019(5): 28-35. (QIAO Bin, ZHANG Sheng, JI Lin. Government behavior, industrial gathering and industrial space balance[J]. On Economic Problems, 2019(5): 28-35. (in Chinese))
- [5] BEAUDRY P, GREEN D A, SAND B M. Spatial equilibrium with unemployment and wage bargaining: theory and estimation [J]. Journal of Urban Economics, 2014, 79: 2-19.
- [6] 陆梦秋, 陈娱, 陆玉麒, 等. “一带一路”倡议下欧亚大陆陆海运输的空间均衡分析[J]. 地理学报, 2018, 73(8): 1526-1539. (LU Mengqiu, CHEN Yu, LU Yuqi, et al. The spatial balance pattern between land and sea transport in Europe-Asia under the Belt and Road Initiative[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(8): 1526-1539. (in Chinese))
- [7] 朱付彪, 陆林. 珠江三角洲都市圈旅游空间均衡发展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1565-1576. (ZHU Fubiao, LU Lin. Spatial tourism equilibrium development in the Pearl River Delta metropolitan area[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 1565-1576. (in Chinese))
- [8] 马志飞, 尹上岗, 乔文怡, 等. 中国医疗卫生资源供给水平的空间均衡状态及其时间演变[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 869-876. (MA Zhifei, YIN Shanggang, QIAO Wenyi, et al. Spatial equilibrium state and its time evolution of medical health resource supply level in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 869-876. (in Chinese))
- [9] BHATTACHARJEE A, MAITI T, PETRIE D. General equilibrium effects of spatial structure: Health outcomes and health behaviours in Scotland[J]. Regional Science and Urban Economics, 2014, 49: 286-297.
- [10] 王慧, 杨益. 扎实做好调水管理推动实现“空间均衡”——访水利部调水管理司司长卢胜芳[J]. 中国水利, 2018(24): 37-38. (WANG Hui, YANG Yi. Do a good job of water transfer management to realize a balanced space —— Interview with Lu Shengfang, director of Water Transfer Management Department of Ministry of Water Resources[J]. China Water Resources, 2018(24): 37-38. (in Chinese))
- [11] 王晶. 贯彻“空间均衡”强化承载能力刚性约束——关于“空间均衡”的学习心得[J]. 水利发展研究, 2018, 18(7): 20-21. (WANG Jing. Carrying out the theory of “spatial balance” and strengthening the rigidity of carrying capacity——On the study of “spatial balance”[J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(7): 20-21. (in Chinese))
- [12] 唐克旺. 对中国治水新方略的认识和体会[J]. 中国水利, 2018(9): 11-13. (TANG Kewang. Understanding and experience of the new general plan of water control in China[J]. China Water Resources, 2018(9): 11-13. (in Chinese))
- [13] 方子杰, 柯胜绍. 对坚持“空间均衡”破解水资源短缺问题的思考[J]. 中国水利, 2015(12): 21-24. (FANG Zijie, KE Shengshao. Highlighting “spatial balance” to solve water shortage problem[J]. China Water Resources, 2015(12): 21-24. (in Chinese))
- [14] 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. (WU Qiang, GAO Long, LI Miao. Spatial equilibrium—the principle of equilibrium between population economy and resources environment must be established[J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(9): 17-24. (in Chinese))
- [15] 亢晓龙, 尹鹏博. 基于不平衡指数的郑州、洛阳水资源空间均衡分析[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(4): 33-35, 56. (KANG Xiaolong, YIN Pengbo. Spatial equilibrium analysis of water resources in Zhengzhou and Luoyang based on disequilibrium index[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2019, 48(4): 33-35, 56. (in Chinese))
- [16] 王豪杰, 左其亭, 郝林钢, 等. “一带一路”西亚地区降水时空特征及空间均衡分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 35-41, 79. (WANG Haojie, ZUO Qiting, HAO Lingang, et al. Analysis of spatial-temporal characteristics and spatial equilibrium of precipitation in West Asia area of “Belt and Road”[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 35-41, 79. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 纪纛芯, 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. (ZUO Qiting, JI Yingxin, HAN Chunhui, et al. Spatial equilibrium calculation method and application in regional water resources distribution based on GIS analysis [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 33-36. (in Chinese))
- [18] 王劲峰, 刘昌明, 王智勇, 等. 水资源空间配置的边际效益均衡模型[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(5): 421-427. (WANG Jinfeng, LIU Changming, WANG Zhiyong, et al. A marginal revenue equilibrium model for spatial water allocation



- [J]. Science in China (SerD): Earth Sciences, 2002, 45(3): 201-202. (in Chinese)
- [19] 王浩, 刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J]. 中国水利, 2016(17): 7-9. (WANG Hao, LIU Jiahong. Collaboration of national water resources with eco-social system in China[J]. China Water Resources, 2016(17): 7-9. (in Chinese))
- [20] 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. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [21] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 和谐度方程(HDE)评价方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(12): 3281-3288. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Evaluation methodology of harmony degree equation (HDE) and its application[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017, 37(12): 3281-3288. (in Chinese))
- [22] ZUO Q T, ZHAO H, MAO C C, et al. Quantitative analysis of human-water relationships and harmony-based regulation in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(8), doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001118.

## Application rules and quantification methods of water resources spatial equilibrium theory

ZUO Qiting<sup>1,2</sup>, HAN Chunhui<sup>1</sup>, MA Junxia<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Spatial equilibrium is an important guide for water conservancy development in the new era, and it is the basic requirement for water conservancy work to be carried out. How to realize spatial equilibrium control of water resources is an important content and challenge of water conservancy development. Based on the author's previous research on the theoretical method and applied research framework of water resource spatial equilibrium, this paper expounds the theoretical requirements and basic principles of water resources spatial equilibrium to answer "Why should we implement spatial equilibrium of water resources?"; the theoretical framework and main content of water resources spatial equilibrium are introduced to answer "What is the theory of water resources spatial equilibrium?"; the application rules and quantification methods of the spatial equilibrium theory of water resources are put forward to answer "How to apply the theory of water resources spatial equilibrium?" The application rules include following three major rules, conforming to three principles, undertaking four tasks, and having three functions, which are the criterion for correctly applying the theory of spatial balance of water resources. The quantitative methods include quantification of spatial equilibrium criteria for water resources, calculation of spatial equilibrium degree of water resources, spatial equilibrium optimization model for water resources, spatial equilibrium planning for water resources, and early warning assessment and comprehensive regulation of water resources spatial equilibrium. It is believed that the theory of spatial equilibrium of water resources is an important support for guiding regional and basin water conservancy and even for integrated spatial equilibrium development. The study provides solutions and specific methods for perfecting the theory of water resources spatial equilibrium and implementing spatial equilibrium control.

**Key words:** spatial equilibrium of water resources; theoretical system; application rules; quantitative methods; spatial equilibrium