

# 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价

刘欢<sup>1</sup>,甘永德<sup>2</sup>,杨钦<sup>1</sup>,张丰搏<sup>1</sup>,李青青<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;

2. 青海大学土木水利学院,青海 西宁 810016)

**摘要:**为研究水资源与关联要素的空间错配问题,基于水网视角,根据适配理论和水资源多维属性理论,提出了包含资源层、社会层、经济层和生态层的水资源与关联要素适配性评价方法,并应用于南水北调中线一期工程影响区。结果表明:该方法可较为合理、系统地揭示水资源与关联要素的适配特征;2016—2020年南水北调中线一期工程影响区水资源与关联要素空间分布相对合理,整体基尼系数为0.388,资源层和社会层水资源与关联要素空间适配性较好,基尼系数分别为0.283和0.284,而经济层和生态层水资源与关联要素错配问题严重,基尼系数为0.501和0.486;南水北调中线一期工程通水后,水资源与关联要素的空间适配性在资源层、社会层、经济层有不同程度改善,在生态层变化不大。

**关键词:**水网;水资源关联要素;适配性;南水北调中线工程

**中图分类号:**TV213.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2024)05-0062-07

**Adaptability evaluation of water resources and associated elements based on perspective of water network//LIU Huan<sup>1</sup>, GAN Yongde<sup>2</sup>, YANG Qin<sup>1</sup>, ZHANG Fengbo<sup>1</sup>, LI Qingqing<sup>2</sup> (1. National Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China)**

**Abstract:** To study the spatial mismatching between water resources and associated elements, an adaptability evaluation method for water resources and associated elements, including resource layer, social layer, economic layer, and ecological layer, was proposed according to the adaptation theory and multi-dimensional attribute theory of water resources from the perspective of water network. Further, the method was applied to the affected area of the first phase of middle route of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP). The results showed that the proposed method can reveal adaptation characteristics of water resources and associated elements reasonably and systematically. The spatial distribution of water resources and associated elements was relatively reasonable in the affected area of the first phase of middle route of the SNWDP for the period 2016-2020, with an overall Gini coefficient of 0.388. Water resources and associated elements showed good spatial adaptability in resource layer and social layer, with Gini coefficients of 0.283 and 0.284, respectively. However, serious mismatching between water resources and associated elements occurred in economic layer and ecological layer, with Gini coefficients of 0.501 and 0.486, respectively. With the implementation of water transfer in the first phase of middle route of the SNWDP, the spatial adaptability of water resources and associated elements in resource layer, social layer, and economic layer has been improved in different degrees, while ecological layer has little change in spatial adaptability.

**Key words:** water network; associated elements of water resources; adaptability; middle route of South-to-North Water Diversion Project

随着经济社会的发展,人类生产生活、生态环境保护等用水需求不断增大,导致水资源供需矛盾愈发突出<sup>[1]</sup>。水资源空间分布与土地、人口和生产力

等布局错位,是造成水资源短缺的关键原因之一<sup>[2-3]</sup>。为此,通过水网将丰水地区的水资源调入缺水地区,成为缓解缺水问题的重要举措<sup>[4]</sup>。2023年

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFC3200203);国家自然科学基金重大项目(52394230);中国科协青年人才托举工程项目(2023QNRC001);国家自然科学基金项目(52242905);四川省区域创新合作项目(22QYCX0069)

**作者简介:**刘欢(1992—),男,高级工程师,博士,主要从事水资源保护研究。E-mail:liuhuan@iwhr.com

**通信作者:**甘永德(1985—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:bjganyd@163.com

5月,中共中央、国务院印发了《国家水网建设规划纲要》,提出从“纲”“目”“结”三方面加快推进国家水网建设,提高水安全保障能力。同时,各流域区域也在积极探索现代水网的建设思路和实施路径<sup>[5-6]</sup>。水利部印发的《关于加快推进省级水网建设的指导意见》,提出到2025年我国省级水网建设规划体系全面建立。科学认识区域水资源与人口、粮食、生态等关联要素的空间均衡状态是分析水网建设必要性的基础。

近年来,国内外学者高度重视水资源与关联要素的空间均衡评价与调控研究,认为通过水资源与关联要素的合理配置,可以强化区域资源优势,更好地发挥经济社会效应。现有研究多致力于利用基尼系数等方法评估分析水资源与土地<sup>[7]</sup>、能源<sup>[8]</sup>和产业经济<sup>[9-10]</sup>等的空间布局特征并提出相应调控建议。随着水网的建设和发展,学者开始关注水网在水资源与关联要素均衡调控中的作用。Desai等<sup>[11]</sup>研究指出,对于水资源时空分布严重不均的国家,建设国家水网是解决水危机的必经之路;González-Bravo等<sup>[12]</sup>认为,宏观层面的水网优化可有效提升水资源、能源、粮食整体效益;赵勇等<sup>[13]</sup>基于水资源配置网络系统模型,分析提出了京津冀水资源、能源、粮食和生态的协同调控方案;王建华等<sup>[14]</sup>解析了智能水网的结构组成与关键技术体系,将其作为新时期水资源优化配置和复杂水资源系统综合调度的关键抓手。总体来看,现有研究主要聚焦在水网建设后对水资源与关联要素的优化作用,但基于水网视角的水资源与关联要素空间适配特征分析比较薄弱。

从水网建设的角度看,首要任务是回答“为什么要建水网”这一核心问题<sup>[15]</sup>。本质上讲,水网建设的根本目的是通过水资源调配,实现水资源多维属性在空间上趋向均衡发挥,包括资源、社会、经济和生态环境等属性<sup>[16]</sup>。对于不同功能类型的水网,其关注的水资源属性存在差异,相应的水资源与关联要素也不同。前期关于水土等资源的空间适配分析多聚焦在水的资源属性方面,涉及要素相对单一,对水网建设的指导意义有限。因此,亟须面向水网建设需求,立足水资源多维属性,合理确定水资源与关联要素,系统量化两者的空间错配程度,为水网建设必要性论证提供有力支撑。为此,本文基于水网视角,以适配理论和水资源多维属性理论为基础,提出了包含资源层、社会层、经济层和生态层的水资源与关联要素适配性评价方法,并在南水北调中线一期工程影响区进行应用分析。

## 1 水资源与关联要素适配性评价方法

### 1.1 理论基础与概念内涵

以适配理论和水资源多维属性理论为基础,提出水资源与关联要素的适配性评价方法。适配理论强调一个系统的稳定存在,需要系统内外部各要素达到相互适应和契合<sup>[17-18]</sup>。通过水网建设实施水资源的时空调配,其根本目的是实现水资源系统的稳定与系统各要素的协调均衡。由于水网的功能定位不同,其关注的水资源属性存在差异,由此导致水资源表征要素及其关联要素发生变化。如城市水网侧重协调水的经济性和社会性,而生态调水则关注水资源的生态属性。一般认为水资源具有资源、社会、经济和生态等多维属性<sup>[16]</sup>。其中,资源属性指水在自然界的资源赋存与表现出的可再生性;社会属性强调水资源是满足人类生存的社会公共物品,应保障用水公平性;经济属性指水资源作为经济生产要素,应强调用水效率最大化;生态属性关注水资源的生态环境服务功能,追求人水和谐。纵观人类文明发展历程,水资源的多维属性不断演化,渔猎文明时期仅表现出资源属性和社会属性,到农业文明时期水资源的经济属性出现并在工业文明时期被逐渐强化。水资源的生态属性萌芽于农业文明,在工业文明后期受到重视,直至生态文明时期达到顶峰<sup>[19]</sup>。

可以认为,水资源与关联要素的适配性指在人水关系组成的复杂系统中,水资源系统要素与其对应的经济社会和资源环境等要素在空间分布上相一致的程度。其具有以下特性:①系统性。水资源、经济社会和资源环境等子系统相互作用,成为一个整体,其在某特定结构组成时会达到适配。②交互性。强调子系统之间、要素之间的交互适应,以寻求整体的稳定。如需水量的增加会触发用水总量约束,反向倒逼需水端优化产业结构,革新节水技术等。③动态平衡。受内外因素的影响,系统适配状态会动态变化,最终达到新的平衡。如气候变化、社会治理水平、技术进步等均会改变水资源与关联要素的适配状态。

水资源多维属性决定了水资源与关联要素的类型和表征因子复杂多样。基于水网视角开展水资源与关联要素的适配性评价,首先需要聚焦水网建设需求,确定其关注协调的水资源属性,进而针对性地确定水资源与关联要素的表征因子。

### 1.2 评价思路与技术流程

#### 1.2.1 评价思路

从资源层、社会层、经济层和生态层4个层面,

提出水资源与关联要素适配性评价思路,系统识别水资源开发利用与经济社会发展和生态环境保护存在的错配问题。

**a. 资源层。**以水资源赋存与光、热、土地、能源、矿产等资源赋存为评价对象,关注水资源与其他相关自然资源的空间分布异质性,为资源开发利用提供本底认知。

**b. 社会层。**聚焦人口繁衍、粮食供给、能源保障等人类基本诉求,以水资源供给能力与人口规模、粮食产量、能源消费量等社会福利价值要素为评价对象,表征水资源的社会福利价值满足情况。其中,水资源供给能力代表一个地区为社会提供水公共服务的能力。

**c. 经济层。**聚焦人类用水节水的经济效益,以水资源消耗量与 GDP、第三产业增加值等经济价值产出为评价对象。选择水资源消耗量作为水资源表征要素,原因在于其综合反映了节水水平,体现了对水资源经济价值的考量。

**d. 生态层。**将生态环境看作一个基本用水户,以生态安全为基本原则,将生态供水量和生态需水量作为评价对象。其中生态供水量并非狭义的人工生态补水,而是指一个地区水资源量扣除人类生产生活耗水后留给生态环境的量。

### 1.2.2 技术流程

水网视角下水资源与关联要素适配性评价的技术流程如图 1 所示:①分析水网建设需求,确定水网对协调水资源四维属性的优先次序,进而对资源层、社会层、经济层和生态层的水资源与关联要素适配重要性赋权;②确定 4 个层面适配性评价对象,建立评价因子体系,包括水资源表征因子及其关联的资源、经济、社会、生态因子;③分别针对 4 个层面水资源表征因子与关联要素表征因子开展单因子适配性量化计算,并通过加权综合得到相应适配结果,用基尼系数  $G_i (i = 1, 2, 3, 4)$  表示;④根据 4 个层面水资源与关联要素的适配重要性,加权获得整体适配结果,即整体基尼系数  $G_1$ 。

## 1.3 评价方法

### 1.3.1 评价因子体系

从资源层、社会层、经济层和生态层分别提出水资源表征因子及其关联的资源、经济、社会、生态因子,建立水资源与关联要素适配性评价因子体系。

**a. 资源层。**水资源赋存采用当地水资源量、地表水资源量、地下水资源量等定量表征,关联的资源赋存表征因子包括适宜生产的平原面积、日照时数、积温及能源、矿产储量等。

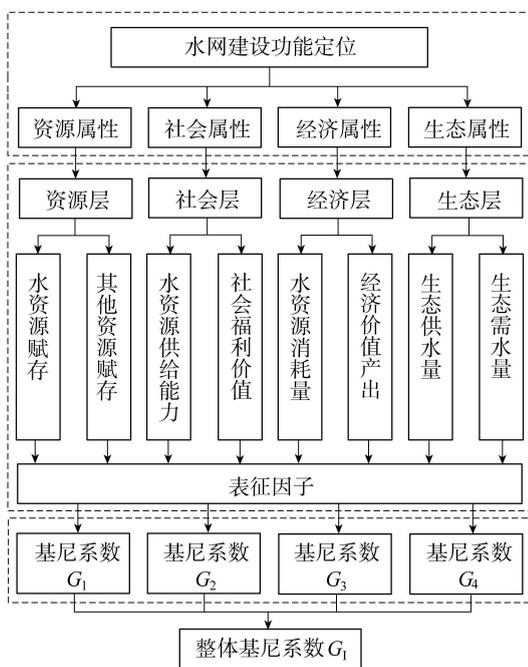


图 1 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价技术流程

Fig. 1 Technical process for adaptability evaluation of water resources and associated elements from perspective of water network

量和水资源供给质量综合表征。数量上可采用水资源供给量、水库蓄水量等表征。质量上选择城乡供水管道长度、农业有效灌溉面积等因子表征。社会福利价值通过总人口或城镇人口数量、粮食产量、能源消费量等表征。

**c. 经济层。**水资源消耗量采用耗水总量或分行业耗水量等表征。相应地,经济价值产出采用 GDP、工业增加值、第三产业增加值等表征。

**d. 生态层。**生态需水量可按照河流、湖泊、湿地等生态需水以及地下水管控要求综合确定,也可采用适宜生态空间面积间接表征。生态供水量在实践中可结合地区资源赋存条件、经济社会发展特点、资料可得性等,灵活选择或扩充评价因子。

### 1.3.2 评价步骤

#### 1.3.2.1 单因子适配性量化

选择单一水资源表征因子分别与关联的资源、经济、社会、生态因子,构成不同量化因子组。利用基尼系数计算各组因子适配性<sup>[20-21]</sup>,方法如下:①根据水网布局确定水网覆盖范围,将其按照行政区、流域等划分多个区划单元;②针对每个区划单元,逐一计算其量化因子值占整个水网覆盖区总值的百分比;③计算待评价两个量化因子的相对值,按该相对值由小到大对各区划单元进行排序;④根据区划单元排序,依次计算待评价两个量化因子的累积百分比,绘制两者变化曲线。⑤采用基尼系数对

曲线弯曲特征进行定量表达。如按照单位水资源对应耕地面积由小到大将水网覆盖范围分成 4 个区划单元;区划单元 1 拥有全区 20% 的水资源和 10% 的耕地资源;区划单元 2 拥有 40% 的水资源和 20% 的耕地资源;区划单元 3 拥有 30% 的水资源和 50% 的耕地资源;区划单元 4 拥有 10% 的水资源和 20% 的耕地资源,由此得到两者关系曲线(图 2)。该曲线是一个内凹曲线,其弯曲程度反映了两因子空间分布不均衡的程度。45°线为绝对均匀线,曲线距绝对均匀线越近,表明两因子空间分布越均衡;反之,两因子空间错配越严重。将图 2 中曲线划分出的两个区域面积分别记作  $A$  和  $B$ ,则  $A$  与  $A+B$  之比为基尼系数( $G$ )。目前,基尼系数计算方法很多,本文采用下式<sup>[8]</sup>计算:

$$G = \sum_{i=1}^{N-1} (M_i P_{i+1} - M_{i+1} P_i) \quad (1)$$

式中: $M_i$  为第  $i$  个区划单元水资源表征因子的累积百分比; $P_i$  为第  $i$  个区划单元关联要素表征因子的累积百分比; $N$  为区划单元数。

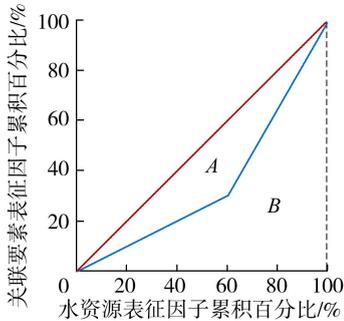


图 2 量化因子累积百分比曲线

Fig. 2 Cumulative percentage curves of quantization factors

基尼系数因其计算简单、结果明确,常用于定量表征两种因子在多个区划单元之间的空间适配程度。 $G$  值在 0~1 之间,值越小表示两因子空间分布适配性越好。根据联合国有关组织规定, $G < 0.2$ 、 $0.2 \leq G < 0.3$ 、 $0.3 \leq G < 0.4$ 、 $0.4 \leq G < 0.5$ 、 $G \geq 0.5$  分别表示两种因子绝对适配、比较适配、相对合理、较不适配和很不适配<sup>[22]</sup>。

### 1.3.2.2 多因子多层次综合评价

根据资源层、社会层、经济层和生态层中各组量化因子的基尼系数值,加权得到每个层面水资源与关联要素的基尼系数  $G_i$ :

$$G_i = \sum_{j=1}^{m_i} (w_{ij} G_{ij}) \quad (2)$$

式中: $G_{ij}$  为第  $i$  层面第  $j$  组量化因子的基尼系数; $w_{ij}$  为第  $i$  层面第  $j$  组量化因子权重,根据因子相对重要性采用层次分析法赋值; $m_i$  为第  $i$  层面量化因子

组数。

根据水网在协调水资源不同属性上的优先次序,采用层次分析法确定各层面适配性评价结果的权重  $w_i$ ,计算水资源与关联要素的整体基尼系数  $G_1$ :

$$G_1 = \sum_{i=1}^4 (w_i G_i) \quad (3)$$

## 2 案例分析

### 2.1 研究区概况与研究数据

考虑水网重要性和资料可获取性等因素,选择南水北调中线一期工程影响区作为研究区。南水北调中线一期工程于 2014 年 12 月正式通水,其影响区覆盖北京、天津、南阳等 15 市,见图 3。

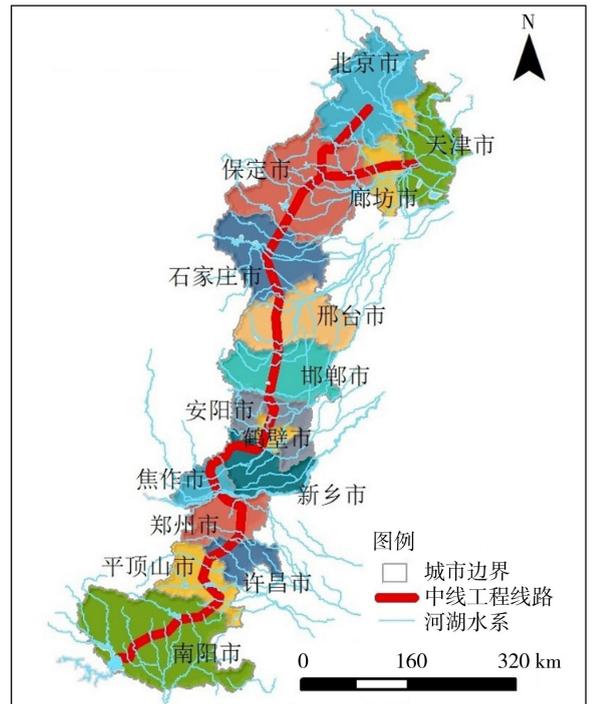


图 3 南水北调中线一期工程影响区

Fig. 3 Affected area of first phase of middle route of South-to-North Water Diversion Project

研究以各地市作为区划单元,针对资源层、社会层、经济层和生态层,构建了水资源与关联要素评价因子体系,如图 4 所示(图中\*表示水资源表征因子,其他为关联要素表征因子)。分别选择 2010—2014 年和 2016—2020 年两个时段,分析南水北调中线一期工程通水前后影响区水资源与关联要素的适配结果变化。图 4 中通水前本地水资源量来源于第二次全国水资源调查,通水后水资源量为通水前本地水资源量与年均水资源调入量之和减去年均调出量;平原面积基于全国 90 m 尺度数字地形格网,统计坡度不超过 3°的土地面积得到;年均日照时数和年均 10℃ 以上积温来源于国家基本气象站

1956—2021 年统计值;供水量、耗水量、水资源调入调出量、生活生产耗水量来源于各年度水资源公报数据均值;城镇人口数量、粮食产量、能源消费量、GDP、工业增加值、第三产业增加值来源于各年度统计年鉴数据均值;河流生态需水量参照 SLT 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》中阈值标准确定;适宜生态空间面积为 1980 年人类活动影响较小时期的林草植被与河湖湿地面积之和。

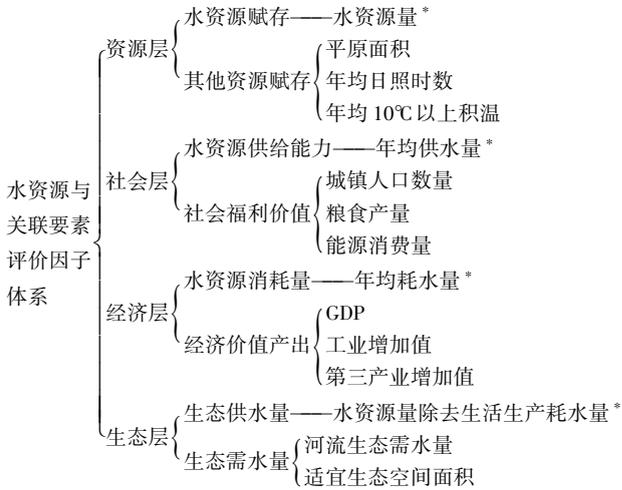


图 4 水资源与关联要素评价因子体系

Fig. 4 Evaluation factor system for water resources and associated elements

由式(1)计算研究区各组表征因子的基尼系数,并确定其权重。由式(2)计算资源层、社会层、经济层、生态层水资源与关联要素的适配结果。本文考虑 4 个层面评价结果同等重要,按等权重计算整体基尼系数。

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 现状分析

根据 2016—2020 年数据得到南水北调中线一期工程影响区水资源与关联要素适配性评价结果,如表 1 所示。水资源与关联要素整体基尼系数达到 0.388,表明水资源开发利用与经济社会发展和生态环境保护之间的空间适配性属相对合理的水平。在

不同层面上,水资源与关联要素的适配性差异明显。资源层基尼系数最低,为 0.283,说明区域水、土、光、热等资源比较适配,为区域资源组合开发提供了良好的条件。社会层基尼系数为 0.284,区域水资源供给与其社会福利价值之间呈比较适配的空间格局,反映出我国对社会基本用水公平做出的协调努力。相比之下,水资源与关联要素在经济层和生态层仍面临严重的空间错配问题,基尼系数分别为 0.501 和 0.486,接近甚至处于很不适配的等级。为此,未来需要在水网布局中更多关注区域用耗水与经济产出之间和生态供需水之间的均衡。

表 1 水资源与关联要素适配性评价结果

Table 1 Adaptability evaluation results of water resources and associated elements

评价对象	基尼系数	适配等级
资源层	0.283	比较适配
社会层	0.284	比较适配
经济层	0.501	很不适配
生态层	0.486	较不适配
整体	0.388	相对合理

表 2 给出不同层面水资源与关联要素表征因子组基尼系数与权重。资源层 3 组表征因子的基尼系数为 0.2~0.4,空间适配性较好,其中水资源量与平原面积在空间上最为适配,基尼系数为 0.211。社会层供水量与城镇人口数量、粮食产量、能源消费量的基尼系数分别为 0.249、0.286 和 0.330,说明地市供水已基本实现与城镇化、粮食能源安全的有效协同。经济层耗水量与 GDP、工业增加值和第三产业增加值之间均表现出显著的错配问题,基尼系数分别为 0.499、0.420 和 0.584,反映出水资源的经济属性在各地市间的发挥还很不均衡。以 GDP 为例,15 个地市中,邢台、安阳、新乡、南阳、保定和邯郸 6 市耗水量占总耗水量的 52.8%,但 GDP 仅占总量的 19.7%。生态层生态供水量与河流生态需水量之间显著不适配,基尼系数为 0.571;相比之下,生

表 2 水资源与关联要素表征因子组基尼系数与权重

Table 2 Gini coefficients and weights of representative factor group for water resources and associated elements

评价层	水资源表征因子	关联要素表征因子	表征因子组基尼系数	表征因子组权重
资源层	水资源量	平原面积	0.211	0.40
		年均日照时数	0.320	0.30
		年均 10℃ 以上积温	0.341	0.30
社会层	年均供水量	城镇人口数量	0.249	0.40
		粮食产量	0.286	0.30
		能源消费量	0.330	0.30
经济层	年均耗水量	GDP	0.499	0.40
		工业增加值	0.420	0.30
		第三产业增加值	0.584	0.30
生态层	水资源量除去生活生产耗水量	河流生态需水量	0.571	0.60
		适宜生态空间面积	0.357	0.40

态供水与适宜生态空间面积间的空间适配性有所提升,基尼系数为 0.357,但也接近较不适配的等级。

该评价方法立足资源层、社会层、经济层和生态层,系统回答了如何科学认识区域水资源开发利用与经济社会发展和生态环境保护间的空间适配问题,避免了单一性评价结果带来的不确定性。以南水北调中线一期工程影响区为例,若水资源与关联要素空间适配性评价只停留在资源层或社会层,则会掩盖其在经济层和生态层的显著错配问题。反之,如果仅聚焦经济层或生态层上水资源与关联要素的错配,则会对资源的本底条件认识不清,忽视政府在维持社会用水公平上做出的努力。

### 2.2.2 通水前后对比分析

对比南水北调中线一期工程通水前后影响区水资源与关联要素适配性评价结果(图5),可以看出通水后水资源与关联要素在空间上的适配性有所提高,整体基尼系数从 0.412 下降到了 0.388。南水北调中线一期工程全面通水以来,已累计向受水区调水逾 600 亿  $m^3$ ,一定程度上改善了地市间水资源与关联要素的空间错配关系。跨流域调水对各地市水资源量的空间调节使资源层基尼系数从 0.314 下降到 0.283,水、土、光、热等资源空间分布格局趋向一致。社会层和经济层的基尼系数同样表现出一定幅度的降低,相对变化率分别为-9.12%和-5.84%。与资源层不同的是,社会层和经济层水资源与关联要素适配性的提高不完全受水资源空间调节影响,也会受到地区社会进步和产业经济变化的作用。生态层基尼系数在通水前后变化不大,可能是通水时间还比较短,水资源空间调配的生态效应尚未显现。

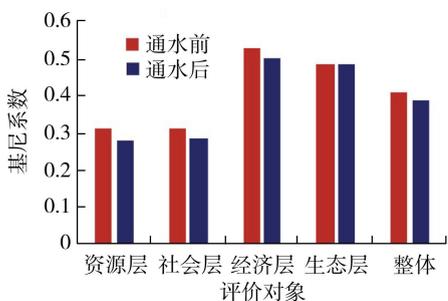


图5 通水前后水资源与关联要素适配性评价结果

Fig. 5 Evaluation results of adaptability of water resources and associated elements before and after water transfer

对比分析可以看出,南水北调中线一期工程在协调水资源与关联要素空间适配性方面做出了一定的贡献,但未来工程推进应重点做好经济社会用水与经济产出和生态需水间的协调。自 2021 年以来,南水北调中线一期工程开始加强对北方河流的生态补水,推动了滹沱河、白洋淀等一批河湖生态改

善,本文研究成果整体上符合当前对南水北调中线一期工程实施效果和后续推进方向的基本认知<sup>[23]</sup>。

## 3 结 语

本文提出了基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价方法,从资源层、社会层、经济层和生态层系统识别水资源开发利用与经济社会发展和生态环境保护间的空间错配问题,具有明确的基础理论支撑和清晰的内涵。在南水北调中线一期工程影响区的应用表明,该方法能较为合理地确定区域水资源与关联要素的适配程度,并能定量揭示存在严重空间错配的元素,可为水网建设提供基础支撑。

南水北调中线一期工程影响区水资源与关联要素整体基尼系数现状值为 0.388,属相对合理的水平,但形势仍不乐观。经济层和生态层基尼系数分别为 0.501 和 0.486,水资源与关联要素面临严重的空间错配问题,接近甚至处于很不适配的等级。为此,南水北调中线工程后续高质量发展需重点关注区域用耗水经济效应和生态效应的协调发挥。南水北调中线一期工程通水后,水资源与关联要素在空间上的适配性相比通水前有所改善,整体基尼系数从 0.412 下降到 0.388,资源层、社会层、经济层的基尼系数均有不同程度的下降,但生态层的基尼系数变化还不明显,可能原因是水资源空间调配的生态效应在短时间内还未显现。

本文提出的评价方法仍存在一定局限性。水资源及其关联的资源环境、经济社会要素复杂,面向资源、社会、经济、生态等领域选择评价因子具有一定的主观性,影响评价结果的可信度和权威性。具体应用时应充分结合研究区实际情况,借助文献调研、专家调查等进一步完善评价因子体系,减少评价结果的不确定性。

### 参考文献:

- [1] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用“四水四定”:基本认知与关键技术体系[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 1-7. (WANG Hao, XU Xinfu, CHENG Jingqing, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 1-7. (in Chinese))
- [2] 郭旭宁,郇建强,李云玲,等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))

- [ 3 ] 方国华,李智超,钟华昱,等.考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18.(FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))
- [ 4 ] 许继军.新时期南水北调工程战略功能定位与发展思路研究[J].中国水利,2021(11):12-14.(XU Jijun. Study on strategic function orientation and development ideas of South-to-North Water diversion Project in new period[J]. China Water Resources, 2021(11): 12-14. (in Chinese))
- [ 5 ] 张金良.构建黄河流域水网的思考[J].水资源保护,2022,38(4):1-5.(ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 1-5. (in Chinese))
- [ 6 ] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等.“荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J].水资源保护,2023,39(3):1-7.(GUO Xuning, LI Yunling, CHANG Tong, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu’ anlan” modern water network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 1-7. (in Chinese))
- [ 7 ] 王建华,何国华,何凡,等.中国水土资源开发利用特征及匹配性分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):1-8.(WANG Jianhua, HE Guohua, HE Fan, et al. Utilization and matching patterns of water and land resources in China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 1-8. (in Chinese))
- [ 8 ] 刘欢,贾仰文,牛存稳.区域水-能源资源的空间分布特征及匹配格局分析[J].水电能源科学,2017,35(6):127-131.(LIU Huan, JIA Yangwen, NIU Cunwen. Analyses of spatial distribution characteristic and matching pattern of regional water-energy resources [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6): 127-131. (in Chinese))
- [ 9 ] 许长新,林剑婷,宋敏.水土匹配、空间效应及区域农业经济增长:基于中国2003—2013的经验分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(7):153-158.(XU Changxin, LIN Jianting, SONG Min. Research on the spatial effects of water and soft matching degree on economic growth of regional agriculture based on empirical analysis during 2003-2013 in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(7): 153-158. (in Chinese))
- [ 10 ] 张吉辉,李健,唐燕.中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析[J].资源科学,2012,34(8):1546-1555.(ZHANG Jihui, LI Jian, TANG Yan. Analysis of the spatio-temporal matching of water resource and economic development factors in China [J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1546-1555. (in Chinese))
- [ 11 ] DESAI V R, GHOSH S N, PATRO J. National water grid: its objective and challenge [J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 11(1): 1-10.
- [ 12 ] GONZÁLEZ-BRAVO R, SAUCEDA-VALENZUELA M, MAHLKNECHT J, et al. Optimization of water grid at macroscopic level analyzing water-energy-food nexus [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(9): 12140-12152.
- [ 13 ] 赵勇,常免宇,桑学锋,等.京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 II:应用[J].水利学报,2022,53(10):1251-1261.(ZHAO Yong, CHANG Huanyu, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei region II: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1251-1261. (in Chinese))
- [ 14 ] 王建华,赵红莉,冶运涛.智能水网工程:驱动中国水治理现代化的引擎[J].水利学报,2018,49(9):1148-1157.(WANG Jianhua, ZHAO Hongli, YE Yuntao. Smart water grid project: the engine driving China’s water management modernization strategy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1148-1157. (in Chinese))
- [ 15 ] 左其亭,郭佳航,李倩文,等.借鉴南水北调工程经验构建国家水网理论体系[J].中国水利,2021(11):22-24.(ZUO Qiting, GUO Jiahang, LI Qianwen, et al. Drawing on experience from the South-to-North Water Diversion Project and establishing a theoretical system of national network of water resources [J]. China Water Resources, 2021(11): 22-24. (in Chinese))
- [ 16 ] 甘泓,汪林,曹寅白,等.海河流域水循环多维整体调控模式与阈值[J].科学通报,2013,58(12):1085-1100.(GAN Hong, WANG Lin, CAO Yinbai, et al. Multi-dimensional overall regulatory modes and threshold values for water cycle of the Haihe River Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1085-1100. (in Chinese))
- [ 17 ] 吴丹,向筱茜,冀晨辉.京津冀水资源与产业结构优化适配模型[J].水利水电科技进展,2022,42(2):20-26.(WU Dan, XIANG Xiaoqian, JI Chenhui. Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 20-26. (in Chinese))
- [ 18 ] SHIPP A J, JANSEN K J. Reinterpreting time in fit theory: crafting and recrafting narratives of fit in medias res [J]. Academy of Management Review, 2011, 36(1): 76-101.

(下转第103页)

- [20] 童凯,赵银军,胡宝清,等. 基于 SWAT 模型的典型厄尔尼诺/拉尼娜年广西北部湾南流江蓝绿水评估[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 46-49. (TONG Kai, ZHAO Yinjun, HU Baoqing, et al. Assessment of blue/green water in typical El Niño/La Niña years in the Nanliu River Basin, beibu gulf based on SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10): 46-49. (in Chinese))
- [21] 李发文,陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [22] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other dataset [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111. (in Chinese))
- [23] 蔡涛. 基于 Mann-Kendall 方法的大凌河中上游 1956—2016 年降水变化特性分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 83-88. (CAI Tao. Analysis of precipitation variations in the middle and upper reaches of the Dalinghe river basin from 1956 to 2016 based on the Mann-Kendall method [J]. Pearl River, 2018, 39(11): 83-88. (in Chinese))
- [24] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1259-1266. (LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe river basin from 1951 to 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1259-1266. (in Chinese))
- [25] 占杨英,汤军,高贤君,等. 二元驱动下泾河流域蓝绿水变化归因分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 93-100. (ZHAN Yangying, TANG Jun, GAO Xianjun, et al. Attribution analysis of blue-green water change in Jinghe River Basin driven by duality [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(12): 93-100. (in Chinese))
- [26] 吴振,徐丹丹,王开然,等. 主成分分析耦合集对分析的区域初始水权分配效果后评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(10): 62-66. (WU Zhen, XU Dandan, WANG Kairan, et al. Post-evaluation for regional initial water rights allocation effect based on PCA and SPA [J]. Yellow River, 2023, 45(10): 62-66. (in Chinese))
- [27] 张金萍,王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))
- [28] 李继清,郑威,李建昌,等. 基于集对分析的径流丰枯分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 16-26. (LI Jiqing, ZHENG Wei, LI Jianchang, et al. Runoff wetness-dryness analysis based on set pair analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 16-26. (in Chinese))
- [29] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiayi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 1-8. (in Chinese))
- [30] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 全球变暖和厄尔尼诺事件[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(5): 663-666. (ZHAO Zongci, LUO Yong, HUANG Jianbin. Global warming and El Niño events [J]. Climate Change Research, 2023, 19(5): 663-666. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-24 编辑:王芳)

(上接第 68 页)

- [19] ZHEN Nahui, RUTHERFURD I, WEBBER M. Ecological water, a new focus of China's water management [J]. Science of the Total Environment, 2023, 879: 163001.
- [20] BARRETT C R, MAURICE S. On a generalisation of the Gini coefficient [J]. Mathematical Social Sciences, 1995, 30(3): 235-244.
- [21] 吴宇哲,鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 123-125. (WU Yuzhe, BAO Haijun. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 123-125. (in Chinese))
- [22] 刘欢,左其亭. 基于洛伦茨曲线和基尼系数的郑州市用水结构分析[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2012-2019. (LIU Huan, ZUO Qiting. Analysis of water consumption structure in Zhengzhou based on Lorenz curves and Gini coefficients [J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2012-2019. (in Chinese))
- [23] 许继军,曾子悦. 适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 27-32. (XU Jijun, ZENG Ziyue. Towards high-quality development: ideas, strategies and suggestions for water resources allocation of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 27-32. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-06 编辑:施业)