

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.017

国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡 评价模型及应用

杨荣雪¹,王 丰¹,王红瑞¹,刘艺欣¹,李一阳¹,姜 欣¹,孙夕明²

(1. 北京师范大学水科学研究院,北京 100875; 2. 济南市水利工程服务中心,山东 济南 250099)

摘要:结合供给侧和需求侧的关系构建水资源空间均衡评价模型,建立了包含供给子系统和需求子系统共12个评价指标的水资源空间均衡评价体系,基于五元联系数定量评估和分析水资源空间均衡水平的状态和变化过程,并采用减法集对势法对水资源空间均衡水平变化的发展趋势和影响因素进行诊断分析。将该模型应用于乌兰察布市11个旗县区,结果表明:水资源空间均衡水平从2011—2020年得到改善的有6个旗县,变化不明显的有5个旗县,其中集宁区一直处于低水平均衡状态;2011—2020年乌兰察布市水资源空间均衡整体水平呈现逐年改善的趋势,2020年供给子系统水平中,集宁区处于反势状态,化德县、商都县处于偏反势状态,需求子系统水平只有集宁区处于偏反势状态;乌兰察布市的脆弱性指标为人均水资源量和生态环境需水负荷。

关键词:水资源空间均衡;国土空间规划;供需关系;五元联系数;减法集对势法;乌兰察布市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0130-07

Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system//YANG Rongxue¹, WANG Feng¹, WANG Hongrui¹, LIU Yixin¹, LI Yiyang¹, JIANG Xin¹, SUN Ximing²
(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Ji'nan Water Conservancy Engineering Service Center, Ji'nan 250099, China)

Abstract: This paper constructed a spatial equilibrium evaluation model of water resources combined with the relationship between supply side and demand side. Based on the quantitative evaluation and analysis of the state and change process of water resources spatial equilibrium level by the five-element connection number, the evaluation model of water resources spatial equilibrium is constructed, and the evaluation system of water resources spatial equilibrium including 12 evaluation indicators of the supply subsystem and the demand subsystem is established. Then, the development trend and influencing factors leading to the change of water resources spatial equilibrium level are diagnosed and analyzed by the subtraction set pairs. Applying the model to 11 counties and districts in Ulanqab City, the study shows that the spatial balance level of water resources has been improved from 2011 to 2020 in 6 counties and 5 counties, among which Jining District has been in a low level of equilibrium. From 2011 to 2020, the overall level of spatial balance of water resources in Ulanqab City has shown a trend of improvement year by year. In the level of supply subsystem in 2020, Jining District is in a counter trend state, while Huade County and Shangdu County are in a counter trend state. At the demand subsystem level, only Jining District is in a negative state. The vulnerability indicators of Ulanqab City are water resources per capita and water demand load of ecological environment.

Key words: water resources spatial equilibrium; territorial spatial planning; relationship of supply and demand; five-element connection number; subtraction set pairs; Ulanqab City

水资源是事关国计民生的基础性自然资源和战略性新兴产业资源,是生态环境的控制性要素,也是经济

社会发展的基础性、先导性、控制性要素,水的承载空间决定了经济社会的发展空间,与国土空间规划

基金项目:国家自然科学基金项目(52279005);济南市财政水务科技创新专项资金资助项目(JNSWKJ202001)

作者简介:杨荣雪(1999—),女,硕士研究生,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: yongxue@mail.bnu.edu.cn.

通信作者:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析和环境规划与评价研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn.

之间存在着相互制约、协调互动的复杂关系。人均占有量少、时空分布不均匀以及水土资源的不匹配是我国水资源的显著特点,加之部分地区的快速发展导致水资源供需矛盾日益从局部逐步发展为一个普遍性的社会问题^[1-2]。中国城镇面积的快速扩张同样也伴随人口的大规模迁移和集聚,导致部分城市水资源天然分布与高强度需水不协调的矛盾逐渐凸显,这严重制约了部分地区的社会经济发展,如何统筹水资源供需与人口布局、经济发展之间的关系,是当今社会普遍关注的重要议题之一^[3]。改革开放以来中国的经济取得了非凡成就,但部分地区存在着经济集聚受水资源制约、用水效率不高、浪费严重、节水意识淡薄等问题,在转向高质量发展阶段需要了解经济集聚效应对局部用水强度的影响机制,合理处理水资源与经济社会发展之间的关系,这对缓解绿色发展中的水资源供需矛盾、实现人水和谐具有重要作用^[4-5]。

区域开发需求程度若与其开发供给能力不相匹配,将会造成区域资源环境与社会发展不相协调,资源空间失衡将不利于协调稳定发展和经济大循环。水资源作为保障我国高质量可持续发展的重要因素,需要在空间上合理布局、均衡发展^[6]。针对我国水资源分布与经济社会发展布局不相适应的问题,2014年3月14日习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的水利发展思路,将“空间均衡”作为重大发展理念^[7]。2021年9月9日水利部李国英部长指出要在节水优先的基础上立足空间均衡的原则构建全国水资源的空间配置格局,为促进国内经济大循环、实现区域协调发展提供强有力保障^[8]。由此可以看出,空间均衡在新时期治水的重要性以及国家层面上对水资源空间均衡的高度重视。2020年自然资源部组织编制了《资源环境承载能力和国土空间规划开发适宜性评价指南(试行)》。当前的资源环境承载力的研究思路已经从单一要素约束转变为多要素协调约束,水资源要素是资源环境承载中的重要评价因素,因此水资源规划要与其他规划相协调^[9]。水资源空间均衡是我国水资源安全保障宏观发展战略的重要组成部分,进行水资源空间均衡研究,是实现国土空间规划“以水四定”的重要基础^[10]。鉴于此,本文面向国土空间规划开展水资源空间均衡评价研究,结合供给侧和需求侧的关系构建空间均衡评价模型,探究水资源空间均衡的评价思路,分析水资源供需的空间匹配态势和时空演变特征,以期对资源开发、国土空间约束、重大水利基础设施布局提供参考。

1 水资源空间均衡评价模型构建

1.1 评价指标体系确立依据

在水资源趋紧和用水需求不断增长的背景下,国土空间规划中提出要合理确定城市发展规模,以水资源供需平衡为核心目标和路径,从而实现“以水四定”。从供需平衡角度量化水资源空间均衡水平,分析区域水资源盈缺程度,厘清水资源开发利用动态变化规律,对于科学规划区域水资源联合调度、管理和形成水资源承载风险防控方案具有重要意义,同时也为构建面向荷载平衡的水资源配置机制及模型提供重要支撑。鉴于此,本文将水资源空间均衡评估划分为水资源空间均衡供给子系统和需求子系统,在供需数量关系的基础上更加注重水资源供给侧和需求侧的水平,以此来构建水资源空间均衡评价指标体系^[11]。

1.2 权重计算方法

采用联系数理论对水资源空间均衡评价指标体系进行分析时,由于每个指标对系统的影响程度有差异,因此需要合理地确定每个指标的权重。层次分析法可以根据专家经验和实际情况合理地对指标进行比较,但缺点是难以忽略个人的主观随意性^[12]。变异系数法具有绝对的客观性,但计算得到的权重值也会与实际的重要程度产生偏差,这样会导致差异性明显的个别指标权值较大。为了避免和弥补单方面赋权的误差和不足,本文采用层次分析法和变异系数法,对水资源空间均衡评价的各项评价指标进行组合赋权^[13]。

首先建立综合评价目标层的一级指标体系(因素层:供给、需求),一级指标的供给和需求同样重要,这里一级指标权重均取0.5。接着判断二级指标(指标层的12个指标)的重要性,并对其重要性赋值,分别通过层次分析法和变异系数法得到主观权重和客观权重,并采用下式得到组合权重:

$$w_i = \alpha_i \beta_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \quad (1)$$

式中: w_i 为组合权重; α_i 为客观权重; β_i 为主观权重。

1.3 联系数理论

五元联系数是在集对分析理论基础上将评价等级范围扩大,通过同、异、反联系数,将评价对象中的确定与不确定因素相结合,通过联系数评价研究对象之间的联系与差异。定义 h 为评价等级, λ 为置信度, $\lambda \in [0.5, 0.7]$ 。当置信度 λ 的取值越大时,评价的等级越保守和稳妥,置信度 λ 取0.6。

1.4 减法集对势法

采用减法集对势法来判别所构建水资源空间均衡评价的联系系数所表述集对的关键指标及其变化趋势^[14]。由水资源空间均衡状态的联系系数计算其减法集对势值,当系统整体的减法集对势处于反势或偏反势,表示其状态向着不利的方向发展;当样本值的减法集对势为反势或偏反势,则表示该样本是影响水资源空间均衡状态的脆弱性指标。

2 乌兰察布市水资源空间均衡评价

作为半干旱地区的乌兰察布市,部分区域的水资源承载能力已经达到甚至超过其限值,水资源已经成为制约当地社会经济发展的主要短板。根据《2020 年乌兰察布市水资源公报》,乌兰察布市 2020 年总供水量为 46 489 万 m³,其中地表水供水量为 2 126 万 m³,地下水供水量为 41 623 万 m³,非常规水资源为 2 740 万 m³。乌兰察布 2020 年用水总量为 46 489 万 m³,其中农业用水量为 33 236 万 m³,工业用水量为 4 390 万 m³,生活用水量为 7 693 万 m³,生态环境用水量为 3 926 万 m³,分别占比为 71%、9%、17% 和 3%。乌兰察布市水资源开发利用整体变化不大,而局部地区却居高不下。根据《乌兰察布市第三次水资源评价初步成果》及《乌兰察布市国土空间总体规划(2021—2035 年)》,乌兰察布市 11 个旗县区的水资源禀赋、用水水平、经济发展程度等方面存在明显差异,多数地区的水资源开发利用情况在空间上呈现失衡状态。国土空间规划作为协调区域经济发展、国土空间布局、生态环境保护的重要机制,按照“多规合一”的要求,乌兰察布市水资源开发与利用的空间布局要支撑国土空间开发需求。以乌兰察布市 11 个旗县区作为评价单元,构建的评价模型流程如图 1 所示,

利用 2011—2020 年数据资料并根据水资源主要突出矛盾选取评价指标,基于五元联系数和减法集对势法定量评估和分析乌兰察布市水资源空间均衡的状态和变化过程。

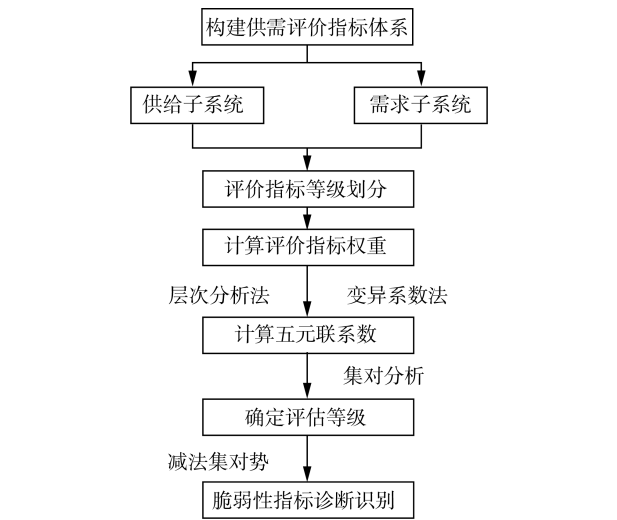


图 1 水资源空间均衡评价模型流程
Fig. 1 Flow chart of water resources spatial equilibrium evaluation model

2.1 评价指标体系确立和权重计算

2.1.1 评价指标体系构建

将水资源空间均衡系统划分为水资源空间均衡供给子系统和需求子系统,结合供给子系统和需求子系统的特性以及乌兰察布市自身的特点,遵循科学合理、相对独立性、相对完备性和可操作性的原则^[15],构建评价指标体系如表 1 所示。所需数据来源于 2011—2020 年《乌兰察布市统计年鉴》、2011—2020 年《乌兰察布市水资源公报》《乌兰察布市第三次水资源评价初步成果》《乌兰察布第三轮水资源调查评价》及《乌兰察布市国土空间总体规划(2021—2035 年)》。

表 1 水资源空间均衡评价指标体系及评价等级划分标准
Table 1 Water resources spatial equilibrium evaluation indicators and evaluation grades

子系统	评价指标	单位	属性	评价等级标准				
				高水平	较高水平	中等水平	较低水平	低水平
供给子系统	人均水资源量	m ³	正向	> 2 000	> 1 500 ~ 2 000	> 1 000 ~ 1 500	> 500 ~ 1 000	≤ 500
	人均可供水量	万 m ³	正向	> 600	> 450 ~ 600	> 300 ~ 450	> 150 ~ 300	≤ 150
	水资源开发利用率	%	负向	< 40	40 ~ < 60	60 ~ < 80	80 ~ < 100	≥ 100
	地下水开发利用率	%	负向	< 55	55 ~ < 70	70 ~ < 85	85 ~ < 100	≥ 100
需求子系统	城镇化率	%	负向	< 40	40 ~ < 55	55 ~ < 70	70 ~ < 85	≥ 85
	人口密度	人/km ²	负向	< 100	100 ~ < 400	400 ~ < 700	700 ~ < 1 000	≥ 1 000
	人均日生活用水量	L	负向	< 80	80 ~ < 120	120 ~ < 160	160 ~ < 200	≥ 200
	万元 GDP 用水量	m ³	负向	< 30	30 ~ < 70	70 ~ < 110	110 ~ < 150	≥ 150
	万元工业增加值用水量	m ³	负向	< 10	10 ~ < 20	20 ~ < 30	30 ~ < 40	≥ 40
	农田灌溉定额	m ³ /hm ²	负向	< 100	100 ~ < 150	150 ~ < 200	200 ~ < 250	≥ 250
	水浇地比例	%	负向	< 20	20 ~ < 30	30 ~ < 40	40 ~ < 50	≥ 50
	生态环境需水负荷	%	正向	> 10	> 7 ~ 10	> 4 ~ 7	> 1 ~ 4	≤ 1

2.1.2 评价等级划分

由于水资源空间均衡水平是一个不确定的概念,所以评价的等级标准也是不确定的,需要根据乌兰察布市的实际情况来确定。参考以往有关水资源空间均衡评价^[16-17]、水资源承载力评价^[18-19]、水资源开发利用评价^[20]等相关的研究,对每个指标进行水资源空间均衡评级,共分为高水平、较高水平、中等水平、较低水平、低水平 5 个评价等级。各评价指标的评价等级见表 1。

2.1.3 确定权重

采取层次分析法和变异系数法进行组合赋权计算,得到水资源空间均衡评价指标的综合权重,见表 2。通过层次分析法和变异系数法分别得到各子系统每个指标的权重值,利用组合赋权公式得到子系统各个指标的权重。由于供给子系统和需求子系统同等重要,子系统的权重值均取 0.5,由此得到评价指标的综合权重。

表 2 水资源空间均衡评价指标权重

Table 2 Weights of water resources spatial equilibrium evaluation indicators				
评价指标	层次分析法 权重值	变异系数 法权重	子系统 权重	综合 权重
人均水资源量	0.108	0.292	0.133	0.066
人均可供水量	0.187	0.189	0.149	0.074
水资源开发利用率	0.293	0.362	0.447	0.223
地下水开发利用率	0.412	0.157	0.271	0.136
城镇化率	0.098	0.051	0.037	0.018
人口密度	0.113	0.273	0.245	0.122
人均日生活用水量	0.060	0.039	0.020	0.010
万元 GDP 用水量	0.156	0.068	0.086	0.043
万元工业增加值用水量	0.208	0.204	0.334	0.167
农田灌溉定额	0.135	0.093	0.091	0.046
水浇地比例	0.173	0.075	0.096	0.048
生态环境需水负荷	0.058	0.198	0.092	0.046

2.2 五元系数计算

设水资源空间均衡评价指标体系的样本数据集

表 3 2020 年乌兰察布市水资源空间均衡评价结果

Table 3 Results of water resources spatial equilibrium evaluation in 2020						
评价单元	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	等级
集宁区	0.060	0.283	0.311	0.311	1	低水平均衡
丰镇市	0.327	0.647	0.871	0.891	1	较高水平均衡
卓资县	0.678	0.781	0.903	0.953	1	高水平均衡
化德县	0.322	0.470	0.711	0.895	1	中等水平均衡
商都县	0.335	0.446	0.810	0.934	1	中等水平均衡
兴和县	0.442	0.613	0.889	0.959	1	较高水平均衡
凉城县	0.618	0.705	0.785	0.833	1	高水平均衡
察哈尔右翼前旗	0.335	0.661	0.827	0.938	1	较高水平均衡
察哈尔右翼中旗	0.673	0.755	0.954	0.954	1	高水平均衡
察哈尔右翼后旗	0.170	0.508	0.825	0.876	1	中等水平均衡
四子王旗	0.681	0.869	0.921	0.951	1	高水平均衡
乌兰察布市	0.392	0.635	0.888	0.999	1	较高水平均衡

记为 A 集合,对应的评价等级标准集记为 B 集合,那么样本数据和标准等级之间则可以用联系数来讨论同异反关系。分析集对 $H = (A, B)$ 中的指标特性,并对水资源空间均衡质量评价指标体系进行数据处理和计算,得到 2011—2020 年乌兰察布市各单元的五元联系数计算结果。

利用置信度准则进行均衡等级状态判断,得到 2011—2020 年间水资源空间均衡评价结果。以 2020 年为例,其评价结果如表 3(表中 $h_1 \sim h_5$ 为等级结果)所示。

由表 3 可见,乌兰察布市整体处于较高水平均衡状态;有 4 个旗县处于高水平均衡状态,分别是四子王旗、卓资县、凉城县、察哈尔右翼中旗;有 3 个旗县处于较高水平均衡状态,分别是丰镇市、兴和县、察哈尔右翼前旗;有 3 个旗县处于中等水平均衡状态,分别是化德县、商都县、察哈尔右翼后旗;只有集宁区处于低水平均衡状态。

同理对水资源空间均衡供给和需求子系统进行计算,得到 2011—2020 年间乌兰察布市两个子系统的五元联系数计算结果。2020 年乌兰察布市水资源空间均衡供给子系统的评价结果显示,乌兰察布市水资源供给子系统整体处于中等水平状态,其他旗县等级结果从高到低排序分别为卓资县、凉城县、察哈尔右翼中旗、丰镇市、兴和县、察哈尔右翼前旗、商都县、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼后旗、化德县、集宁区。2020 年乌兰察布市水资源需求子系统的评价结果显示,乌兰察布市水资源空间均衡需求子系统整体处于较高水平状态,其他旗县等级结果从高到低排序分别为化德县、商都县、察哈尔右翼中旗、四子王旗、丰镇市、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼后旗、集宁区、卓资县、兴和县、凉城县。

2.3 历年水资源空间均衡评价结果

同理可得到 2011—2019 年的水资源空间均衡

评价结果。水资源空间均衡水平 2011—2020 年得到改善的有 6 个旗县,分别是卓资县、丰镇市、兴和县、凉城县、察哈尔右翼中旗、四子王旗。卓资县、四子王旗、察哈尔右翼中旗从中等水平均衡状态逐渐提高到高水平均衡状态;凉城县在 2011—2014 年处于中等水平均衡状态,2015—2016 年处于较低水平均衡状态,2017—2019 年逐步提升到高水平均衡状态。兴和县从低水平均衡状态提高到较低水平均衡状态。丰镇市从较低水平均衡状态提高到较高水平均衡状态。水资源空间均衡水平变化不明显的有 5 个旗县,分别是集宁区、化德县、商都县、察哈尔右翼后旗、察哈尔右翼前旗。集宁区一直处于低水平均衡状态;化德县在 2012 年处于较高水平均衡状态,其他年份都处于中等水平均衡状态;商都县在 2011 年和 2013 年处于较低水平均衡状态,其他年份处于中等水平均衡状态;察哈尔右翼后旗 2011—2020 年一直处于中等水平均衡状态。察哈尔右翼前旗在 2012 年、2019 年处于较高水平均衡状态,其他年份处于中等水平均衡状态。

2.4 态势分析和诊断识别

2.4.1 趋势分析

由减法集对势来判断水资源空间均衡水平的微观运动趋势,依据 2011—2020 年乌兰察布市水资源空间均衡评价的联系数以及供给子系统、需求子系统的联系数,计算得到相应的减法集对势并进行态势分析,结果见表 4。由表 4 可知,2011—2020 年乌兰察布市水资源空间均衡整体水平、供给子系统水平、需求子系统水平的减法集对势值全部为正值,除了 2011 年为均势状态外,2012—2020 年全部处于偏同势或同势状态,说明整体水平、供给子系统水平、需求子系统水平呈现逐年改善的趋势,这与由五元联系数判断的状态变化情况基本吻合。

表 4 2011—2020 年乌兰察布市水资源空间均衡评价
减法集对势分析结果

Table 4 Subtraction set pair analysis results of water resources spatial equilibrium evaluation of Ulanqab City from 2011 to 2020			
年份	系统整体	供给子系统	需求子系统
2011	均势	均势	均势
2012	偏同势	偏同势	偏同势
2013	偏同势	偏同势	偏同势
2014	偏同势	偏同势	偏同势
2015	偏同势	偏同势	偏同势
2016	偏同势	偏同势	偏同势
2017	偏同势	偏同势	同势
2018	同势	同势	同势
2019	同势	同势	同势
2020	同势	同势	同势

同理对 2011—2020 年乌兰察布市 11 个单元的水资源空间均衡水平、供给子系统水平、需求子系统水平进行减法集对势分析,结果见图 2。系统单元整体有 3 个单元存在不良态势;集宁区 10 年间全部处于反势和偏反势状态,说明集宁区的水资源空间均衡水平逐渐恶化;丰镇市、商都县只有在 2011 年处于偏反势状态,兴和县只有在 2011 年、2012 年处于偏反势状态,其他年份都处于较好态势,说明除了集宁区外其他单元的水资源空间均衡整体水平逐年提高。而供给子系统有 7 个单元存在不良态势;集宁区 10 年间的减法集对势值全部为 -1,说明集宁区的水资源供给水平持续恶化;化德县除 2012 年外其他年份处于偏反势或反势状态,商都县、察哈尔右

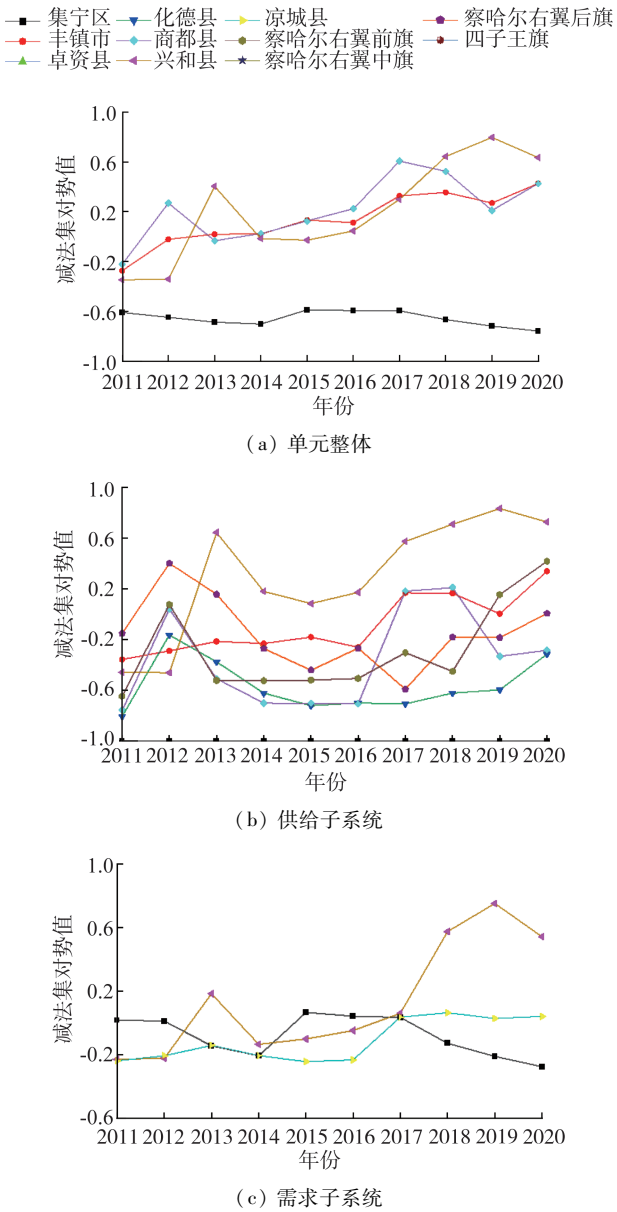


图 2 2011—2020 年乌兰察布市处于不良态势单元的
减法集对势值

Fig. 2 Value of subtraction set pairs of units in bad posture
of Ulanqab City from 2011 to 2020

翼前旗有 7 个年份处于不良态势,兴和县和丰镇市前期处于偏反势状态,后期的水资源供给水平得到提高。需求子系统有 3 个单元存在不良态势,说明需求端的用水水平较高;集宁区在 2014 年、2019 年、2020 年处于偏反势状态,说明集宁区前期的需求水平在逐渐改善,近两年有轻微恶化的趋势;兴和县只有在 2011 年、2012 年处于不良态势,凉城县在前期处于不良态势,说明这两个单元的需求水平恶化的趋势得到了遏制。

2.4.2 现状年诊断识别

各评价单元的水资源空间均衡评价的减法集对势分析结果见表 5。就单元整体的水资源空间均衡水平发展趋势而言,只有集宁区处于反势状态;供给子系统水平中,集宁区处于反势状态,化德县、商都县处于偏反势状态;需求子系统水平中,只有集宁区处于偏反势状态。因此,集宁区需要在供给侧和需求侧采取措施,否则其供需水平将持续恶化;化德县和商都县 2020 年供给子系统分别处于较低水平状态和中等水平状态,未来应需提高水资源供给能力。

表 5 2020 年乌兰察布市各单元水资源空间均衡评价
减法集对势态势分析结果

Table 5 Analysis results of the subtraction set pairs
for each unit water resources spatial equilibrium
evaluation of Ulanqab City in 2020

评价单元	单元整体	供给子系统	需求子系统
集宁区	反势	反势	偏反势
丰镇市	偏同势	偏同势	偏同势
卓资县	同势	同势	偏同势
化德县	偏同势	偏反势	同势
商都县	偏同势	偏反势	同势
兴和县	同势	同势	偏同势
凉城县	偏同势	同势	均势
察哈尔右翼前旗	偏同势	偏同势	偏同势
察哈尔右翼中旗	同势	同势	同势
察哈尔右翼后旗	均势	均势	偏同势
四子王旗	同势	同势	同势
乌兰察布市	同势	同势	同势

采用减法集对势法对现状年水资源空间均衡评价指标进行识别,当由某一指标样本值的联系数计算得到的减法集对势值判定处于反势、偏反势,则认为该指标是导致系统整体评价等级水平较低的主要原因,可诊断识别为该评价单元的脆弱性指标,在未来的发展过程中是主要的调控因子;若指标判定为同势、偏同势,则认为该指标对未来的发展可作为有利因素。

对现状年乌兰察布市和 11 个评价单元的 12 个指标进行减法集对势值计算,发现乌兰察布市整体只有人均水资源量和生态环境需水负荷处于偏反势状态。对于人均水资源量,有 7 个评价单元(集宁

区、丰镇市、化德县、商都县、兴和县、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼后旗)处于反势或偏反势状态。对于生态环境需水负荷,有 9 个评价单元(丰镇市、卓资县、化德县、商都县、兴和县、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼中旗、察哈尔右翼后旗、四子王旗)处于反势或偏反势状态。2011—2020 年乌兰察布市除集宁区外人口呈下降趋势,在当前趋势下,除集宁区外其他地区人均水资源量或将缓慢增加,由于乌兰察布市处于半干旱地区,所以调控该指标困难较大。随着生态文明理念的深入人心,生态环境用水越来越受到人们重视,生态环境需水负荷成为预期可调控的指标。

其他 10 个指标中,人均日生活用水量四子王旗、卓资县、化德县处于反势或偏反势状态,这些地区应积极推进各类节水措施来加强生活节水;水浇地比例集宁区、凉城县、察哈尔右翼前旗、察哈尔右翼后旗处于反势状态;地下水开发利用率集宁区处于反势状态,化德县和商都县处于偏反势状态;人均可用水量集宁区处于反势状态,化德县处于偏反势状态;水资源开发利用率、城镇化率、人口密度只有集宁区处于反势状态;万元 GDP 用水量只有四子王旗处于偏反势状态;万元工业增加值用水量只有凉城县处于反势状态;农田灌溉定额只有卓资县处于偏反势状态。

由以上分析可知,人均水资源量和生态环境需水负荷是系统整体的脆弱性指标。集宁区的脆弱性指标包含供给子系统的全部指标和需求子系统的 3 个指标(城镇化率、人口密度、水浇地比例)。卓资县的脆弱性指标是人均日生活用水量和农田灌溉定额,今后应加强生活节水和农业节水。化德县的脆弱性指标是人均可供水资源量、地下水开发利用率、人均日生活需水量、农田灌溉定额,今后可通过外部调水增加可供水量,同时减少对地下水的开发。商都县的脆弱性指标是地下水开发利用率,所以应压减地下水的使用量。凉城县的脆弱性指标是万元工业增加值用水量和水浇地比例,所以应注重工业节水、提高工业用水效率,水浇地比例过高,需要对水浇地面积进行合理压减。察哈尔右翼前旗和察哈尔右翼后旗的脆弱性指标是水浇地比例,需要对部分水浇地面积进行合理压减。四子王旗的脆弱性指标是人均日生活用水量和万元 GDP 用水量,应注重生活节水和提高用水效率。

3 结 语

本文基于五元联系数和减法集对势法相结合的方法,结合供给侧和需求侧的关系构建空间均衡评

价模型,并以乌兰察布市为例进行了应用分析,考虑了国土空间规划中对水资源的实际需要,定量评估和分析地级市尺度水资源空间均衡的状态和变化过程,更加全面地识别出不同单元内部和之间的联系。该评价模型可为城市水资源宏观调控、实现高质量发展提供新的思路。

对乌兰察布市水资源空间均衡评价表明:2011—2020 年水资源空间均衡水平得到改善的有 6 个旗县,分别是卓资县、丰镇市、兴和县、凉城县、察哈尔右翼中旗、四子王旗,到 2020 年西部地区处于高水平均衡状态;2011—2020 年乌兰察布市水资源空间均衡整体水平、供给子系统水平、需求子系统水平均呈现逐年改善的趋势,这与通过五元联系系数判断的状态变化基本吻合;乌兰察布市整体的脆弱性指标为人均水资源量和生态环境需水负荷,生态环境需水负荷成为预期可调控的指标。

在应用本文模型时,需要根据当地水资源禀赋条件及自然资源概况等实际情况构建相应的评价指标体系。此外,本文是在多年平均状况下开展的水资源空间均衡评价,未来可划分丰平枯年份,分别进行脆弱因子分析。

参考文献:

[1] 李轶,万芬芬,张文龙.长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 1-9. (in Chinese))

[2] 夏军,翟金良,占车生.我国水资源研究与发展的若干思考[J].地球科学进展,2011,26(9):905-915. (XIA Jun, ZHAI Jinliang, ZHAN Chesheng. Some Reflections on the research and development of water resources in China [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 905-915. (in Chinese))

[3] 张超,杨艳昭,封志明,等.基于人粮关系的“一带一路”沿线国家土地资源承载力时空格局研究[J].自然资源学报,2022,37(3):616-626. (ZAHNG Chao, YANG Yanzhao, FENG Zhiming, et al. Spatio-temporal patterns of the land carrying capacity in the Belt and Road region based on human-cereals relationship [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 616-626. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 卢亚丽,徐帅帅,沈镭.基于胡焕庸线波动的长江经济带水资源环境承载力动态演变特征[J].自然资源学报,2021,36(11):2811-2824. (LU Yali, XU Shuaishuai, SHEN Lei. The dynamic evolution of water resources environmental carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on the fluctuation of Hu Line [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(11): 2811-2824. (in Chinese))

[6] 易雨君,徐嘉欣,宋劫,等.黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J].水资源保护,2022,38(1):133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 133-140. (in Chinese))

[7] 黄建水.新时期治水的内涵和任务——习近平同志重要治水思想学习体会[J].水利发展研究,2014,14(9):17-18. (HUANG Jianshui. Connotation and task of water control in the new period—learning experience of important water control thoughts from Xi Jinping [J]. Water Resources Development Research, 2014, 14(9): 17-18. (in Chinese))

[8] 左其享,李倩文,马军霞.人水关系学的研究方法及应用前景[J].水电能源科学,2022,40(5):38-41. (ZUO Qiting, LI Qianwen, MA Junxia. Research Methods and application prospect of human-water relationship discipline [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(5): 38-41. (in Chinese))

[9] 贾绍凤.高质量发展阶段的水治理标志要求[J].中国水利,2021(6):55-57. (JIA Shaofeng. Indicating requirement of water governance in high-quality development stage [J]. China Water, 2021(6): 55-57. (in Chinese))

[10] 武连洲,白涛,黄强.基于RVA阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J].水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 168-174. (in Chinese))

[11] 孙才志,孟程程.中国区域水资源系统韧性与发展效率的协调关系评价[J].地理科学,2020,40(12):2094-2104. (SUN Caizhi, MENG Chengcheng. Evaluation of the development coordination relationship between resilience and efficiency of regional water resources system in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2094-2104. (in Chinese))

(下转第 144 页)

- [16] UNEP. TWAP rivers portal-indicators application [EB/OL]. [2023-02-08]. <http://twap-rivers.org/indicators/>.
- [17] The Correlates of War. State system membership (v2016) [EB/OL]. [2023-02-08]. <https://correlatesofwar.org/data-sets/state-system-membership/>.
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Aquastat data [EB/OL]. [2023-02-08]. https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y.
- [19] The World Bank. Population density (people per sq. km of land area) [EB/OL]. [2023-02-08]. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST?view=chart>.
- [20] SMALL M, SINGER J D. Resort to arms: international and civil wars, 1816-1980 [M]. California: Beverly Hills SAGE Publications, 1982.
- [21] World Bank Group. Beyond scarcity: water security in the Middle East and North Africa [M]. Washington, D. C.: The World Bank, 2018: 25-51.
- [22] 武永亮, 赵书良, 李长镜, 等. 基于 TF-IDF 和余弦相似度的文本分类方法 [J]. 中文信息学报, 2017, 31(5): 138-145. (WU Yongliang, ZHAO Shuliang, LI Changjing, et al. Text classification method based on TF-IDF and cosine similarity [J]. Journal of Chinese Information Processing, 2017, 31(5): 138-145. (in Chinese))
- [23] 张振豪, 过弋, 韩美琪, 等. 基于关键词相似度的短文本分类方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(1): 26-29. (ZHANG Zhenhao, GUO Yi, HAN Meiqi, et al. Research on short text classification based on keyword similarity [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(1): 26-29. (in Chinese))
- [24] 孙海生. 作者关键词共现网络及实证研究 [J]. 情报杂志, 2012, 31(9): 63-67. (SUN Haisheng. Author keyword co-occurrence network analysis: an empirical research [J]. Journal of Intelligence, 2012, 31(9): 63-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-02-10 编辑: 熊水斌)

(上接第 136 页)

- [12] 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(3): 86-95. (MIAO Zhaowang, WU Chengguo, CUI Yi, et al. Connection number and coupling coordination degree model and application of water resources spatial equilibrium evaluation analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2021, 42(3): 86-95. (in Chinese))
- [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. (YANG Yafeng, YAN Jiawei, WANG Hongrui, et al. Spatial-temporal variation of water environment carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 714-723. (in Chinese))
- [14] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1997(1): 14-22. (CHENG Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997(1): 14-22. (in Chinese))
- [15] 郭旭宁, 郦建强, 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))
- [16] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese))
- [17] 江东, 林刚, 付晶莹. “三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1085-1101. (JIANG Dong, LIN Gang, FU Jingying. Discussion on scientific foundation and approach for the overall optimization of “Production-Living-Ecological” space [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1085-1101. (in Chinese))
- [18] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [19] 高玉琴, 吴迪, 刘海瑞, 等. 城市化影响下区域水资源承载力评价 [J]. 水利水电科技进步, 2022, 42(3): 1-8. (GAO Yuqin, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 1-8. (in Chinese))
- [20] 潘辛伟, 金菊良, 刘晓薇, 等. 水资源利用系统脆弱性机理分析与评价方法研究 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1599-1609. (PAN Zhengwei, JIN Juliang, LIU Xiaowei, et al. Mechanism and evaluation method of water resources utilization system vulnerability [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1599-1609. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-06 编辑: 彭桃英)