

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.010

塔里木河流域水资源适应性利用能力评价及调控

李 星¹, 左其亭^{1,2,3}, 韩淑颖¹, 李东林¹, 马军霞^{1,3}

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

摘要:基于 TOPSIS 法与耦合协调度方法对塔里木河流域及 5 地州水资源适应性利用能力进行量化研究,在此基础上,选取 5 个典型指标,利用多维临界调控模型对塔里木河流域水资源、经济社会、生态环境子系统间协调发展进行调控。结果表明:2004—2016 年,塔里木河流域水资源适应性能力在 0.4~0.5,整体处于中等水平,其中阿克苏地区水平最低,和田地区水平最高;通过多维临界调控后,系统熵值由现状年的 0.296 降低到调控后的 0.027,系统趋于稳定,说明各子系统间协调程度变优,朝有序协调方向发展。

关键词:水资源适应性利用;多维临界调控;系统熵;TOPSIS 法;耦合协调度;塔里木河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0063-06

Evaluation of adaptive utilization capacity of water resources in Tarim River and its regulation // LI Xing¹, ZUO Qiting^{1,2,3}, HAN Shuying¹, LI Donglin¹, MA Junxia^{1,3} (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the methods of TOPSIS and coupling coordination degree, the adaptive utilization capacity of water resources in Tarim River Basin and five administrative regions was quantitatively studied. On this basis, five typical indexes were selected to control the coordinated development of water resources, economic society and ecological environment subsystem in Tarim River Basin by multi-dimensional critical regulation model. The results show that, from 2004 to 2016, the water resource adaptive utilization capacity in Tarim River Basin is between 0.4-0.5, which is in the middle level as a whole; the average level of Aksu Region is the lowest, and the average level of Hotian Region is the highest. After the multi-dimensional critical regulation, the entropy value of the system decreases from 0.296 in the current year to 0.027 in the year after the regulation, and the system tends to be stable, indicating the coordination degree among subsystems has become better and the system is developing in the direction of orderly coordination.

Key words: water resource adaptive utilization; multi-dimensional critical regulation; system entropy; TOPSIS; coupling coordination degree; Tarim River Basin

21 世纪以来,气候变化影响下的水资源适应性研究成为全球应对气候变化的重要需求和研究热点。左其亭^[1]对水资源适应性利用(adaptive utilization of water resources, AUWR)的定义为:在水资源开发利用过程中,遵循自然规律和社会发展规划,适应人类活动、气候变化、陆面变化等环境变化带来的影响,保障水系统良性循环所选择的水资源利用方式。目前针对水资源适应性利用的量化方法研究较少。为定量评估水资源适应性利用水平,本

文将水资源适应性利用能力定义为在水资源适应性利用理论指导下,以水资源适应性利用水平评价体系为基础,通过定量评估方法得到的水资源适应性利用效果好坏与总体水平。在水资源适应性利用研究方面,刘昌明等^[2]阐述了气候变化对水文水资源的主要影响,提出了应对气候变化的水资源适应性对策;夏军等^[3]研究了气候变化下水资源脆弱性和适应性管理理论与方法研究的准则、原则以及气候变化对水循环和水资源利用的影响,并针对水资源

基金资助:国家自然科学基金(U1803241, 51779230)

作者简介:李星(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: lixingzzut@126.com

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

脆弱性变化提出了适应的对策和措施;张秀琴等^[4]从“水资源适应性管理”的概念与内涵入手,对水资源管理适应气候变化的研究现状、重点研究领域及研究方法进行了系统总结并提出了存在的问题和未来研究重点;左其亨^[5]对水资源适应性利用理论的应用规则、关键问题和解决途径进行了全面阐释;杨帆等^[6]通过构建适用于生态变化的水流变化方程来制定适应生态的水量调度政策。在水资源调控研究方面,吴泽宁等^[7]基于可持续发展的内涵和流域水资源利用的角度,提出了流域水资源调控方案可持续发展评价的准则和量化评价方法;Neelakantan等^[8]利用 BP 神经网络方法将模拟技术和优化方法结合应用于水库调度仿真优化模型研究中;Basu^[9]将模糊评价模型与进化算法相耦合,将联合优化调度模型的多目标概化成单目标来优化求解。

塔里木河流域从 20 世纪 80 年代开始水资源问题与生态环境问题凸显,针对塔里木河流域的研究也越来越多。王光焰等^[10]对 20 世纪 50 年代以来塔里木河流域水资源问题进行了系统梳理,并提出了未来塔里木河流域水资源研究重点关注方向;艾克热木·阿布拉等^[11]根据塔里木河流域 1960—2016 年实测水文资料,分析了塔里木河流域水资源的变化规律和用水效率的变化情况,提出了针对性的建议和措施;廖淑敏等^[12]则分析了生态输水对塔里木河流域生态环境变化的影响。目前针对塔里木河流域水资源适应性利用能力方面的研究较少,有必要对塔里木河流域水资源适应性利用能力进行评价,为塔里木河流域发展提供有效支撑。为此本文利用 TOPSIS 法与耦合协调度方法对塔里木河流域及 5 地州水资源适应性利用能力进行量化研究,并基于当前存在的问题,以多维临界调控模型对塔里木河流域各子系统协调发展程度进行调控。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

塔里木河位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地北部,地理坐标为 73° 10' E ~ 94° 5' E、34° 55' N ~ 43° 8' N,发源于天山山脉及喀喇昆仑山,全长 2 179 km,是中国最长的内陆河、世界第五大内陆河。塔里木河流域主要有和田河、叶尔羌河和阿克苏河三大源流,流域面积 102 万 km²,包括 5 个地州的 42 个县(市)和 4 个兵团师的 45 个团场,流域内人口逾 1 200 万人。塔里木河流域多年平均天然径流量为 398.3 亿 m³,流域水资源总量为 429 亿 m³。不合理的水资源开发利用对塔里木河流域的生态环境和经济发展的可持续性造成了一定的影响,干流的

水资源过度开发影响到各支流及下流的生态水系,对生态环境用水不断压缩导致生态环境退化。塔里木河流域人口占新疆的 46.85%,GDP 总值占新疆的 27.68%,人均 GDP 远低于新疆平均水平,且城镇化水平低,经济社会发展总体上较为落后。

1.2 数据来源

本文所用数据来自 2005—2018 新疆及克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称“克州”)、喀什地区、巴音郭楞蒙古自治州(以下简称“巴州”)、阿克苏地区、和田地区国民经济和社会发展统计年鉴。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

评价水资源适应性利用能力,需要构建一套从水资源适应性利用理论两大规律、四大原则、三大任务、四大功能四方面出发的评价指标体系^[5],综合考虑塔里木河流域水资源禀赋条件和经济社会、生态环境状况,选定 25 个评价指标构建了涵盖水资源、经济社会、生态环境 3 个子系统的水资源适应性利用能力评价指标体系如图 1 所示(括号内数值为指标权重)。

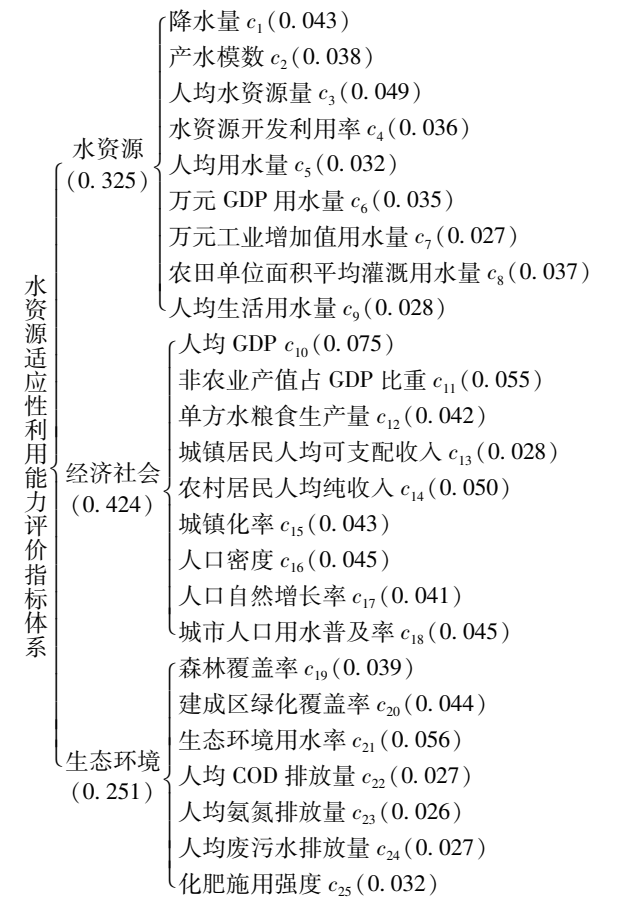


图 1 塔里木河流域水资源适应性利用能力评价指标体系
Fig.1 Evaluation index system of water resource adaptive utilization capacity

2.2 TOPSIS 法

TOPSIS 法^[13]的核心思想是定义决策问题的最优解和最劣解的距离,通过计算各评价目标与理想解和反理想解的距离获得与理想解的贴近度,实现评价目标的优劣排序^[14]。贴近度取值在 0~1 之间,数值愈接近 1,表示相应的评价目标越接近最优水平^[15]。TOPSIS 法计算步骤如下:

步骤 1:根据评价方案和图 1 所示的评价指标体系,建立指标体系判断矩阵。设有 m 个待评方案, n 个评价指标, x_{ij} 为评价方案 i ($i=1,2,\dots,m$) 中评价指标 j ($j=1,2,\dots,n$) 的取值,可得判断矩阵 $A=(A_{ij})$ 。对评价指标数据进行规范化处理,按照指标属性将评价指标分为越大越优型和越小越优型两类,对应标准化计算公式分别为

$$v_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\max} + x_{\min}} \quad (1)$$

$$v_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{\max} + x_{\min}} \quad (2)$$

式中: v_{ij} 为规范化后的指标数值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为各评价方案中指标的最大、最小值。

步骤 2:确定最偏好和最不偏好的指标加权价值集合,分别为

$$\begin{cases} V^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \\ V^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \end{cases} \quad (3)$$

式中 V^+ 、 V^- 分别为最偏好的方案(正理想解)和最不偏好的方案(负理想解)。

步骤 3:计算各评价方案中评价向量到正理想解的距离 L_i^+ 与和负理想解的距离 L_i^- :

$$\begin{cases} L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_j^+ 、 v_j^- 分别为评价指标 j 在各方案中的最偏好值和最不偏好值。

步骤 4:计算评价方案 i 中评价对象与最优方案的贴近度 R_i :

$$R_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \quad (5)$$

R_i 越大,表明评价方案 i 的水平越接近最优水平。

根据上述公式计算得到水资源、经济社会、生态环境子系统贴近度。

2.3 耦合协调度

利用耦合协调度可分析不同城市或区域间、同一城市或区域中不同时期的耦合协调发展状况,并进行定量评价^[16]。将水资源适应性利用能力水平

转化为水资源、经济社会、生态环境 3 个子系统间的耦合协调度,用 3 个系统的耦合协调度来定量描述水资源适应性利用能力,水资源适应性利用能力计算公式^[17]为

$$D = \sqrt{CT} \quad (6)$$

$$\text{其中 } C = \left[\frac{R_{WR}R_{ES}R_{EE}}{(R_{WR} + R_{ES} + R_{EE})/3} \right]^{1/3}$$

$$T = w_{WR}R_{WR} + w_{ES}R_{ES} + w_{EE}R_{EE}$$

式中: D 为水资源适应性利用能力,代表水资源、经济社会、生态环境之间的耦合协调程度; C 为耦合指数,代表水资源、经济社会、生态环境之间发展水平耦合程度; T 为综合评价指数; R_{WR} 、 R_{ES} 、 R_{EE} 分别为水资源、经济社会、生态环境子系统贴近度,由式(5)计算得到; w_{WR} 、 w_{ES} 、 w_{EE} 分别为水资源、经济社会、生态环境子系统权重,由熵权法计算得到。

2.4 多维临界调控模型

多维临界调控对象是自然和人文系统组成的复杂巨系统^[18]。多维临界调控可对多个相互矛盾的目标进行科学分析,使复杂巨系统向协调和有序方向运行,也可应用于水资源优化配置研究。为提升子系统间协调性,在塔里木河流域水资源适应性利用能力评价结果的基础上,采用多维临界调控模型对选定的序参量进行调控,实现子系统间的协调发展。多维临界调控模型计算步骤^[19]如下:

a. 确定多维调控模型有序度。子系统 q 评价指标 j 序参分量 e_{qj} 有序度为

$$u_q(e_{qj}) = \frac{e_{qj} - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (7)$$

式中: $u_q(e_{qj})$ 为序参分量 e_{qj} 的有序度; $e_{\min}$ 、 $e_{\max}$ 分别为 e_{qj} 的最小和最大临界阈值。序参分量 e_{qj} 对子系统有序程度的“总贡献”可通过 $u_q(e_{qj})$ 计算:

$$u_q(e_q) = \sum_{j=1}^n \lambda_j u_q(e_{qj}) \quad (8)$$

式中: $u_q(e_q)$ 为子系统 q 的有序度; λ_j 为序参量分量 e_{qj} 的权系数, $\lambda_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ 。

b. 确定序参量。由图 1 可知,3 个子系统中经济社会系统权重最大(0.424),人均水资源量、人均 GDP、生态环境用水率指标分别是各子系统中权重最大的评价指标,因此在选定序参量过程中,考虑调控目标及指标权重的影响,将人均水资源量、人均 GDP、生态环境用水率 3 个指标作为基本序参量进行调控,以建立水资源适应性能力评价和多维临界调控的联系,并考虑调控目标要求,确定另外 2 个序参量,见表 1。

根据熵的含义,利用子系统有序度建立判别系

表 1 塔里木河流域水资源适应性利用能力调控序参量
Table 1 Ordered parameters of water resources adaptive utilization regulation in Tarim River Basin

子系统	调控目标	序参量
水资源系统	水资源量	人均水资源量
	用水效率	万元工业增加值用水量
经济社会系统	经济发展水平	人均 GDP
	生活幸福水平	城镇化率
生态环境系统	生态用水保证	生态环境用水率

熵函数:

$$S_r = - \sum_{q=1}^3 \frac{1 - u_q(e_q)}{3} \lg \frac{1 - u_q(e_q)}{3} \quad (9)$$

式中: S_r 为系统熵; $u_1(e_1)$ 、 $u_2(e_2)$ 、 $u_3(e_3)$ 分别为水资源、经济社会、生态环境子系统的有序度。

c. 根据判别公式寻优:

$$\Delta S_r = S_{r,n+1} - S_{r,n} \quad (10)$$

式中: $S_{r,n+1}$ 为系统第 $n+1$ 次调控后的末态熵; $S_{r,n}$ 为第 n 次调控后的熵; ΔS_r 为第 $n+1$ 次调控引起的熵变。根据熵变 ΔS_r 的大小, 可判断系统演变方向。当连续调控所得 ΔS_r 不断接近于 0 时, 表明调控后系统熵逐渐减小, 系统熵收敛, 即为寻优过程。

3 结果与分析

3.1 水资源适应性利用能力评价

采用式(1)~(5)计算塔里木河流域 2004—2016 年水资源、经济社会、生态环境 3 个子系统贴适度, 结果如图 2 所示。由图 2 可见: ①水资源子系统贴适度呈现下降趋势, 由 0.77 降为 0.21。塔里木河流域近些年用水需求不断增加, 造成水资源的过度开发利用, 因此要建立完善的水资源开发与水量分配制度, 合理使用水资源, 兼顾农业和生态用水。②经济社会子系统贴适度逐渐上升, 由 0.12 上升到 0.65, 说明经济社会发展水平得到提升。西部大开发战略实施带动地区农牧产业发展, 经济社会发展态势良好。③生态环境子系统贴适度呈现下降

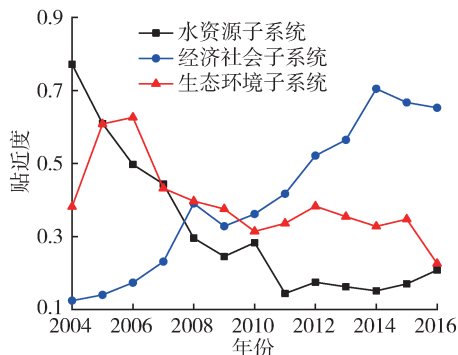


图 2 塔里木河流域各子系统贴适度
Fig. 2 Closeness degree of each subsystem in Tarim River Basin

趋势, 由 0.38 降为 0.23, 说明塔里木河流域生态环境遭到破坏。塔里木河流域耕地面积扩充、地下水超采、挤占生态用水等问题导致人水矛盾突出, 使得生态环境整体水平较低。

采用式(6)计算出塔里木河流域及 5 地州 2004—2016 年水资源适应性利用能力, 结果如图 3 所示。整体来看, 塔里木河流域水资源适应性利用能力由 0.462 上升为 0.487, 多年平均值为 0.486, 整体变化幅度较小, 呈缓慢增加趋势。各个子系统间相互影响制约, 使得流域整体水资源适应性利用能力比较稳定。同时, 水资源过度开发、生态环境恶化也是流域水资源适应性利用能力提升缓慢的主要原因。从各地州来看, 和田地区水资源适应性利用能力平均值最高, 克州、喀什、巴州、阿克苏依次降低。和田地区自然环境和人才资源有限, 开发利用程度低, 经济发展速度缓慢, 但生态环境得到保护, 水资源满足基本需求, 各子系统间协调发展; 受叶尔羌河与阿克苏河影响, 阿克苏与喀什地区是塔里木河流域水资源最丰富的地区, 开发利用程度、经济发展水平较高, 但过度的开发利用导致生态赤字, 故阿克苏、喀什地区水资源适应性利用能力略低。此外, 和田、喀什、巴州、阿克苏 4 地州的水资源适应性利用能力均呈增加趋势, 但克州 2016 年仅为 0.440, 低于 2004 年的 0.461, 克州地处塔里木河流域西北位置, 州内多为高山峻岭, 存在发展空间有限、气候条件差、人口规模相对较少等问题, 虽然生态环境较好, 但经济发展缓慢, 水资源开发利用率低, 导致系统间发展不匹配。

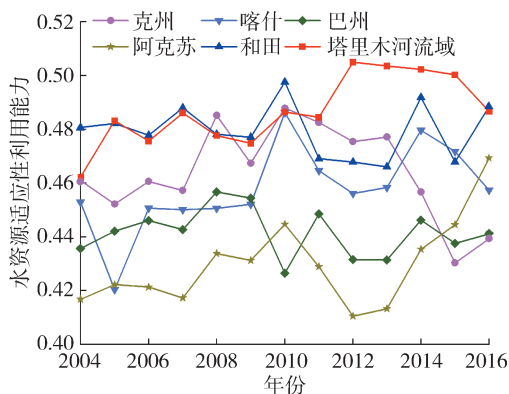


图 3 塔里木河流域及 5 地州水资源适应性利用能力
Fig. 3 Water resource adaptive utilization capacity of Tarim River Basin and five administrative regions

3.2 多维临界调控

根据塔里木河流域水资源适应性能力评价结果, 发现塔里木河流域在水资源、经济社会、生态环境各方面发展不协调, 因此需要进行调控, 并确定调控指标阈值。

根据联合国教科文组织规定的缺水警戒线确定人均水资源量最差值为 $1\,700\text{ m}^3$,通过分析流域未来人口变化及水资源调查评价成果,并结合流域 2004—2017 年人均水资源量,确定其最优值为 $7\,052\text{ m}^3$ 。《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》中规定在 2030 年,万元工业增加值用水量控制在 40 m^3 以下,同时考虑新疆、塔里木河流域及其各地(州)万元工业增加值用水量情况,将 40 m^3 作为最优值,将 2004—2017 年流域内 5 地州的最大值 437.3 m^3 作为最差值。根据 2030 年初步达到初等发达国家水平的规划目标,人均 GDP 将达到约 14 万元,将其作为人均 GDP 最优值,最差值为 2004—2017 年塔里木河流域内 5 地州最差值,为 0.453 万元。2017 年中国城镇化水平为 0.585,而新疆为 0.528,比较接近,同时未来我国城镇化整体水平预测值在 0.6 左右,因此将 0.6 作为城镇化水平最优值^[20],最差值为 2004—2017 年塔里木河流域内 5 地(州)最小值,为 0.12。生态环境用水率阈值则是根据 2004—2017 年塔里木河流域及 5 地(州)的变化情况确定,最优值和最差值分别为 0.028 和 0.002 1。

以 2017 年为现状年,以 2030 年为目标年,对塔里木河流域水资源适应性利用能力进行调控。通过现状年数据与阈值对比分析,合理调控序参量。调控过程中子系统序参量和系统熵值变化见表 2。初始值为 2017 年流域现状水平,系统熵为 0.296,其中人均水资源量、人均 GDP、城镇化率、生态环境用水率为正向指标,调控值不断增加;万元工业增加值用水量为负向指标,调控值不断减小。由调控结果可知,系统熵值由最初 0.296 降低到 0.027,系统熵值不断减小并趋于 0。说明在外界调控措施作用下,水资源、经济社会、生态环境子系统间协调性增强且趋于最优。对比 2030 年预测值,除万元工业增加值用水量外,调控后的人均水资源量、人均 GDP、城镇化率、生态环境用水率均优于预测值,2030 年

表 2 调控过程子系统序参量及系统熵值变化

Table 2 Changes of each suborder parameter and system entropy value in the regulation process

项目	人均水资源量/ m^3	万元工业增加值用水量/ m^3	人均 GDP/ 万元	城镇化率/%	生态环境用水率/%	系统熵值
初始值	6806.4	78.8	3.24	31	1.1	0.296
第 1 次调控	6867.8	69.1	5.93	38	1.5	0.253
第 2 次调控	6929.2	59.4	8.62	46	2.0	0.200
第 3 次调控	6990.6	49.7	11.31	53	2.4	0.163
第 4 次调控	7050.0	40.5	13.90	59	2.7	0.027
2030 预测值	4364.2	40.0	6.120	65	0.2	0.360

预测值的系统熵值为 0.360,说明在无外界调控措施情况下,塔里木河流域水资源、经济社会、生态环境子系统间的协调有序程度不会增加,且有可能降低。在采用调控措施后,系统熵值可趋于 0,实现各个子系统之间和谐发展,表明外界调控措施很有必要,在一定程度上可以保证流域可持续发展。在水资源禀赋较高的塔里木河流域,调控人均 GDP、城镇化率和生态环境用水率对改善人民生活品质、促进社会和谐发展和保证生态环境可持续发展具有重要意义。

4 结 论

a. 塔里木河流域在 2004—2016 年水资源适应性利用能力平均值为 0.486,5 地州水资源适应性利用能力均在 0.4~0.5 之间,整体处于中等水平;时间序列上,塔里木河流域水资源适应性利用能力呈现缓慢增长趋势;空间上,阿克苏地区水资源适应性利用能力平均水平最低,和田地区平均水平最高。

b. 通过多维临界调控模型,对人均水资源量、万元工业增加值用水量、人均 GDP、城镇化率、生态环境用水率等指标进行调控,系统熵值由现状年 0.296 降低至 0.027,说明在外界调控措施作用下,可有效降低系统熵值,实现系统寻优。

c. 塔里木河流域水资源适应性利用能力评价结果表明,构建的评价指标体系和量化方法可行有效。但构建的指标体系涉及指标过多,对基础数据的完整性、准确性等要求较高;同时衡量水资源、生态环境子系统的指标有待进一步研究和完善。

参考文献:

[1] 左其享. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. 南水北调与水利科技,2007,15(1):18-24. (ZUO Qiting. Theory of adaptive utilization of water resources and its application of prospect in water management practices[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1):18-24. (in Chinese))

[2] 刘昌明,刘小莽,郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响,2008(2):21-27. (LIU Changming, LIU Xiaomang, ZHENG Hongxing. Discussion on the influence of climate change on hydrology and water resources [J]. Impact of Science on Society, 2008(2):21-27. (in Chinese))

[3] 夏军,刘春蓁,刘志雨,等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策[J]. 自然杂志,2016,38(3):167-176. (XIA Jun, LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, et

- al. Impact of climate change and adaptive strategy on terrestrial water cycle and water resources in East Monsoon Area of China [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38 (3):167-176. (in Chinese))
- [4] 张秀琴,王亚华. 中国水资源管理适应气候变化的研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24 (12): 2061-2068. (ZHANG Xiuqin, WANG Yahua. A review of adaptive management research on China's water resources management under climate change [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (12): 2061-2068. (in Chinese))
- [5] 左其亭. 水资源适应性利用理论的应用规则与关键问题[J]. 干旱区地理, 2017, 40 (5): 925-932. (ZUO Qiting. Application rules and key issues in theory of adaptive utilization of water resources [J]. Arid Land Geography, 2017, 40 (5): 925-932. (in Chinese))
- [6] 杨帆,薛联青,张洛晨,等. 塔里木河生态水流情势分析及其适应性利用[J]. 水资源保护, 2018, 34 (5): 41-49. (YANG Fan, XUE Lianqing, ZHANG Luochen, et al. Analysis of ecological water regime in Tarim River and its adaptive utilization [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (5): 41-49. (in Chinese))
- [7] 吴泽宁,左其亭,丁大发,等. 黄河流域水资源调控方案评价与优选模型[J]. 水科学进展, 2005 (5): 735-740. (WU Zening, ZUO Qiting, DING Dafa, et al. Assessment and optimization model of water resources control alternative for the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2005 (5): 735-740. (in Chinese))
- [8] NEELAKANTAN T R, PUNDARIKANTHAN N V. Neural network-based simulation optimization model for reservoir operation [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126 (2): 57-64.
- [9] BASU M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multi-objective short-term hydrothermal scheduling [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69 (2): 277-285.
- [10] 王光焰,王远见,桂东伟. 塔里木河流域水资源研究进展[J]. 干旱区地理, 2018, 41 (6): 1151-1159. (WANG Guangyan, WANG Yuanjian, GUI Dongwei. A review on water resources research in Tarim River Basin [J]. Arid Land Geography, 2008, 41 (6): 1151-1159. (in Chinese))
- [11] 艾克热木·阿布拉,王月健,凌红波,等. 塔里木河流域水资源变化趋势及用水效率分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37 (1): 112-120. (AIKEREMU Abula, WANG Yuejian, LING Hongbo, et al. Analysis of water resources change trend and water use efficiency in Tarim River Basin [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37 (1): 112-120. (in Chinese))
- [12] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 120-126. (in Chinese))
- [13] HWANGC L, YOON K. Multiple attribute decision making: lecture notes in economics and mathematical systems [M]. Berlin: Springer, 1981.
- [14] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36 (2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (2): 1-7. (in Chinese))
- [15] 熊雪珍,何新玥,陈星,等. 基于改进 TOPSIS 法的水资源配置方案评价[J]. 水资源保护, 2016, 32 (2): 14-20. (XIONG Xuezheng, HE Xinyue, CHEN Xing, et al. Evaluation on water resources allocation schemes based on improved TOPSIS [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2): 14-20. (in Chinese))
- [16] 张明斗,莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析[J]. 资源科学, 2014, 36 (1): 8-16. (ZHANG Mingdou, MO Dongyan. Coupling coordination degree of urban land use benefit and urbanization [J]. Resource Science, 2014, 36 (1): 8-16. (in Chinese))
- [17] 孙才志,阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. 水资源保护, 2018, 34 (5): 1-8. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (5): 1-8. (in Chinese))
- [18] 杨明杰,杨广,何新林,等. 基于多维临界调控模型的玛纳斯河流域水资源调控[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017, 35 (2): 241-246. (YANG Mingjie, YANG Guang, HE Xinlin, et al. Adjustment of water resources in Manasi River Basin based on multi-dimension critical adjustment model [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2017, 35 (2): 241-246. (in Chinese))
- [19] 高甫章,何新林,杨广. 克拉玛依市水资源多维临界调控研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (1): 73-80. (GAO Fuzhang, HE Xinlin, YANG Guang. Study on multidimensional critical regulation of water resources in Karamay [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (1): 73-80. (in Chinese))
- [20] 谢立中. 未来中国城镇化的理想水平与乡村治理的中国方案[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2020, 73 (3): 159-168. (XIE Lizhong. The ideal level of urbanization in the future China and the Chinese solution for rural governance [J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Sciences), 2020, 73 (3): 159-168. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-27 编辑:熊水斌)