

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.009

塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析

吴青松¹, 马军霞^{1,2}, 左其亭^{1,2,3}, 韩淑颖¹

(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; 3. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要:为科学评价塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度,明晰影响其和谐发展的主要因素,系统考虑水资源禀赋、地区发展水平、生态环境状况等多个方面,构建了水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度评价指标体系,运用组合权重 SMI-P 法定量测算了 2007—2016 年塔里木河流域 5 地州各子系统及耦合系统的和谐程度。结果表明:时间维度上,各地州耦合系统和谐程度均有所提升,但提升速度及幅度存在差异,且目前均未达到基本和谐状态,大多处于接近不和谐状态;空间维度上,巴音郭楞蒙古自治州耦合系统和谐程度最好,是目前唯一达到较和谐程度的地区,其次为克孜勒苏柯尔克孜自治州和阿克苏地区,而和田及喀什地区则明显落后于其他 3 个地区;各子系统对耦合系统和谐度提升的贡献从大到小依次为生态环境、经济社会、水资源,且贡献率时空差异显著;各地州和谐发展水平仍存在较大提升空间,应在协调多系统均衡发展的同时着重突破各自薄弱环节。

关键词:和谐程度;水资源;经济社会;生态环境;耦合系统;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)02-0055-08

Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin // WU Qingsong¹, MA Junxia^{1,2}, ZUO Qiting^{1,2,3}, HAN Shuying¹ (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China; 3. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin and make clear the main factors that affect its harmonious development, a harmony evaluation index system of water resources-economic society-ecological environment coupling system is constructed, considering water resources endowment, regional development level and ecological environment condition. The harmony degree of each subsystem and coupling system in five regions of Tarim River Basin from 2007 to 2016 was quantitatively calculated by using combination weight SMI-P method. The results show that, in time dimension, the harmony degree of coupling system has been improved, but there are differences in speed and range, and none of them has reached the basic harmonious state, most of them are in the non-harmonious state; in spatial dimension, Bazhou coupling system is the best, and it is the only region to reach a relatively harmony degree, followed by Kezhou and Aksu Prefecture, while Hotan and Kashgar Prefecture are obviously behind the other three regions; the contribution of each subsystem to the harmony degree of the coupling system is ecological environment, economic society and water resources from big to small, and the contribution rate has significant space-time difference; there is still much room to improve the harmonious development level of each state. We should break through their weak links while coordinating the balanced development of multi-system.

Key words: harmony degree; water resources; economic society; ecological environment; coupling system; Tarim River Basin

基金项目:国家自然科学基金(U1803241,51779230)

作者简介:吴青松(1997—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:wuqingsongzzu@163.com

通信作者:马军霞(1968—),女,高级实验师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:majx@zzu.edu.cn

水资源是维持生态平衡、保障人类生存和经济社会发展的战略性、基础性资源^[1]。经济社会的快速发展有助于提升国家或地区的经济实力,促进社会繁荣稳定,但同时会增加水资源的供给压力,且其产生的大量污染物将给地区生态环境带来严重负面影响^[2-3]。水环境恶化和水资源过度开发利用等现象破坏地区水循环过程,进一步加剧水资源短缺现状,进而抑制经济社会发展,打破生态平衡^[4-5]。水资源开发利用、经济社会发展及生态环境保护之间存在着复杂、变动的互馈关系^[6]。目前,已有学者综合考虑水资源、经济社会、生态环境,针对水资源承载力^[7-8]、水资源安全^[9]、水资源利用效率^[10]、流域健康^[11]等方面开展了大量研究,水资源-经济社会-生态环境耦合系统研究成为研究热点。

塔里木河位于新疆南部北缘,是中国第一大陆内河,在保障流域用水安全、经济社会良性发展和生态环境健康等方面起着至关重要的作用。空间布局上,各地州地质地貌、气候条件、水资源禀赋、用水技术水平等方面均存在显著差异。众多学者针对塔里木河流域水资源开发利用、地区发展状况和生态环境质量等方面开展了大量研究^[12-13],如,艾克热木·阿布拉等^[14]运用水文频率分析法和 DEA 模型探究了塔里木河流域水资源的变化规律和用水效率;刘昀东等^[15]基于生态足迹模型研究了塔里木河流域 1950—2015 年的生态承载力和生态足迹的变化趋势,并评估其可持续发展水平。从现有研究成果来看,分析塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境各要素之间互馈关系的研究较少,缺少系统全面定量描述各地州水-经济-生态系统和谐水平和识别和谐发展的主要影响因子的研究。

本文选取塔里木河流域 5 地州为研究对象,基于组合权重单指标量化-多指标综合-多准则集成(the evaluation method of single index quantification and multiple index synthesis and poly-criteria integration, SMI-P) 评价方法^[16-17]对其水资源-经济社会-生态环境耦合系统进行和谐程度量化评估,并分析和谐程度的时空差异性,以期为塔里木河流域的资源优化配置和区域协调发展提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

塔里木河发源于天山山脉及喀喇昆仑山,流经巴音郭楞蒙古自治州(巴州)、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州(克州)、喀什地区、和田地区 5

地州,主要支流包括阿克苏河、叶尔羌河等^[18]。塔里木河流域面积约 102 万 km²,仅次于长江流域,位居全国第二位。5 个地州总面积 109.59 万 km²,约占新疆总面积的 66%,2016 年末 5 个地州常住人口约 1 131 万人,耕地面积 169 万 hm²,国内生产总值 0.28 万亿元,分别约占新疆的 47.2%、41.0% 和 29.2%^[19]。

1.2 数据来源

本文研究期为 2007—2016 年,共选取 18 个指标对 5 个地州水资源-经济社会-生态环境耦合系统进行和谐程度量化研究。指标数据主要来源于各地州统计年鉴、《水资源公报》《新疆统计年鉴》《新疆水资源公报》及政府工作报告等。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

针对水资源-经济社会-生态环境耦合系统进行和谐程度量化分析,在构建指标体系时需综合考虑全面性和代表性、科学性和目的性、可操作性和实用性等原则。对水资源子系统,所选指标主要涉及水资源禀赋、资源开发利用水平两个方面;经济社会子系统主要考虑地区经济水平、社会发展状况;生态环境子系统则主要体现地区水生态、水环境状况。综上,构建了包含水资源、经济社会、生态环境 3 个准则层,产水模数、人均水资源量等共 18 个指标的和谐程度评价指标体系^[8,16,20],如图 1 所示。此外,参考已有相关文献^[4,20]和国家规范,并考虑地区特性和实际状况,确定各指标节点值,见表 1。

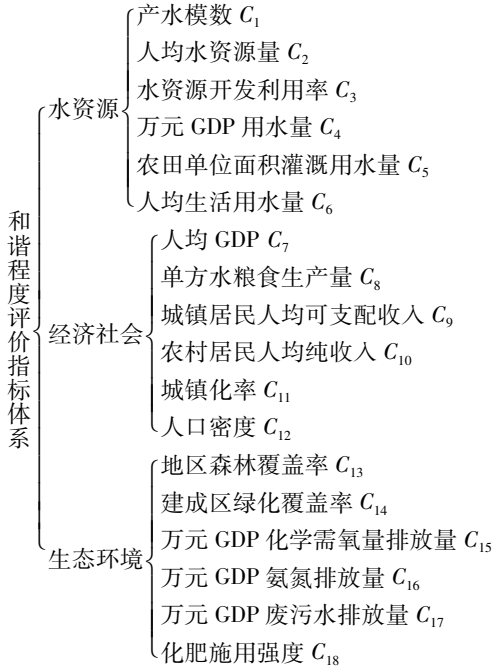


图 1 和谐程度评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of harmony degree

表 1 评价指标节点值
Table 1 Node values of evaluation indexes

特征节点值	$C_1/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	C_2/m^3	$C_3/\%$	C_4/m^3	$C_5/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	C_6/m^3	$C_7/\text{万元}$	$C_8/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_9/\text{万元}$
最差值	2	200	0(80)	2 000	15 000	100	1	0.1	0.45
较差值	5	500	5(60)	1 000	12 000	60	2.2	0.2	0.78
及格值	10	1 000	10(50)	500	7 500	40	3.8	0.5	1.10
较优值	20	1 670	20(40)	220	4 500	20	12	1	3.05
最优值	35	10 000	25(30)	60	1 500	10	20	2	5.00

特征节点值	$C_{10}/\text{万元}$	$C_{11}/\%$	$C_{12}/$ ($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)	$C_{13}/\%$	$C_{14}/\%$	C_{15}/kg	C_{16}/kg	C_{17}/m^3	$C_{18}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
最差值	0.20	25	3 500(2)	0.5	10	10	1	55	800
较差值	0.29	35	2 000(5)	2	20	5	0.5	40	500
及格值	0.38	45	625(20)	5	30	3	0.3	25	350
较优值	1.44	60	400(50)	10	40	1	0.1	10	200
最优值	2.50	80	140(90)	20	50	0.1	0.01	2	100

注: C_3 和 C_{12} 为双向指标。

2.2 权重确定方法

采用 G1 赋权法^[21] 和熵权法^[22] 分别确定各指标的主观权重和客观权重。对同一指标,主观权重在时间尺度上均取同一数值,而熵权法计算时以 5 个地州指标数据为样本,故客观权重在时间序列上存在差异。基于上述方法,记指标 k 的主、客观权重分别为 w_{sk} 和 w_{ok} ,考虑使用上述单一权重可能无法完整描述各指标的重要性信息,故将两种方法综合得到组合权重 w_{zk} ^[23]。

$$\begin{cases} w_{zk} = \alpha w_{sk} + \beta w_{ok} \\ \alpha + \beta = 1 \\ (a - \beta)^2 = D(w_{sk}, w_{ok}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: α, β 分别为主观、客观偏好程度系数; $D(w_{sk}, w_{ok})$ 为欧氏距离函数。

2.3 和谐度量化方法

2.3.1 单指标量化

采用模糊隶属度方法描述评价指标以便于计算和对比分析,通过模糊隶属函数 $f(C_{kt})$ 将各指标统一映射到 $[0, 1]$ 上, C_{kt} 为指标 k 在 t 时刻的数值,所得隶属度即为指标和谐度,其中评价指标分为正向、逆向和双向 3 类,不同特征指标的和谐度可分别用相应的分段线性隶属函数计算得到^[24],各指标节点具体取值见表 1。

2.3.2 多指标综合

基于上述单指标和谐度及权重计算结果,可分别计算水资源、经济社会、生态环境子系统的和谐度:

$$\begin{cases} D_{wt} = \sum_{k=1}^{n_1} w_{zk} D_{ws}(C_{kt}) \\ D_{st} = \sum_{k=1}^{n_2} w_{zk} D_{ss}(C_{kt}) \\ D_{et} = \sum_{k=1}^{n_3} w_{zk} D_{es}(C_{kt}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{wt}, D_{st}, D_{et} 为 t 时刻水资源、经济社会、生态环境子系统和谐度; $D_{ws}(C_{kt}), D_{ss}(C_{kt}), D_{es}(C_{kt})$ 分别为通过模糊隶属函数映射得到的 t 时刻水资源、经济社会、生态环境子系统中指标 k 的和谐度; n_1, n_2, n_3 分别为各子系统的指标个数。

2.3.3 多准则集成

根据和谐量化的全面性准则,地区整体和谐度需要综合考虑水资源、经济社会、生态环境多个方面,因此,进一步运用多准则集成方法计算耦合系统和谐度:

$$D_t = w_w D_{wt} + w_s D_{st} + w_e D_{et} \quad (3)$$

式中: w_w, w_s, w_e 分别为水资源、经济社会、生态环境 3 个子系统和谐度的权重,考虑各系统的相对重要程度及协同发展的必要性,均取 $1/3$; D_t 为 t 时刻耦合系统整体和谐度。基于上述量化步骤所得的指标、子系统、耦合系统和谐度可判断其和谐等级, $D=0$ 时为完全不和谐, $0 < D < 0.2$ 时为基本不和谐, $0.2 \leq D < 0.4$ 时为较不和谐, $0.4 \leq D < 0.6$ 时为接近不和谐, $0.6 \leq D < 0.8$ 时为较和谐, $0.8 \leq D < 1$ 时为基本和谐, $D=1$ 时为完全和谐^[24]。

3 结果与分析

3.1 指标权重

表 2 为评价指标部分年份的主观、客观及组合权重数值,可以看出,水资源子系统中组合权重最大指标为人均水资源量,最小为农田单位面积灌溉用水量,经济社会子系统分别为人均 GDP 和单方水粮食生产量,生态环境子系统则持续为地区森林覆盖率和化肥施用强度。此外,对同一指标,其权重大小在时间尺度上存在一定的波动幅度,表现为因样本数据变化而导致的差异性;而对同一子系统,不同指标重要性排位并未发生明显变化,表现为指标权重

表 2 指标权重计算结果

Table 2 Calculation results of index weight

评价指标	主观权重	2007 年		2010 年		2013 年		2016 年	
		客观权重	组合权重	客观权重	组合权重	客观权重	组合权重	客观权重	组合权重
C_1	0.191	0.095	0.157	0.119	0.166	0.101	0.160	0.087	0.157
C_2	0.248	0.230	0.242	0.281	0.260	0.218	0.238	0.309	0.268
C_3	0.132	0.377	0.218	0.387	0.221	0.408	0.225	0.416	0.225
C_4	0.159	0.183	0.167	0.124	0.147	0.125	0.147	0.078	0.133
C_5	0.145	0.019	0.100	0.026	0.103	0.016	0.102	0.015	0.102
C_6	0.125	0.096	0.115	0.063	0.103	0.133	0.128	0.095	0.115
C_7	0.214	0.446	0.292	0.352	0.266	0.410	0.279	0.364	0.264
C_8	0.130	0.135	0.131	0.075	0.108	0.100	0.119	0.065	0.108
C_9	0.178	0.011	0.122	0.021	0.119	0.007	0.121	0.004	0.121
C_{10}	0.170	0.102	0.147	0.211	0.185	0.097	0.146	0.048	0.129
C_{11}	0.154	0.052	0.120	0.102	0.135	0.059	0.123	0.156	0.155
C_{12}	0.154	0.254	0.188	0.239	0.187	0.327	0.212	0.363	0.223
C_{13}	0.229	0.178	0.208	0.410	0.300	0.393	0.293	0.277	0.250
C_{14}	0.166	0.115	0.145	0.120	0.148	0.070	0.129	0.130	0.150
C_{15}	0.144	0.224	0.177	0.101	0.127	0.081	0.119	0.197	0.167
C_{16}	0.151	0.230	0.184	0.169	0.158	0.206	0.172	0.198	0.171
C_{17}	0.190	0.226	0.205	0.155	0.177	0.209	0.198	0.161	0.178
C_{18}	0.120	0.027	0.081	0.045	0.090	0.041	0.089	0.037	0.084

在时间尺度上的统一性;综合来看,当前权重能够较好地反映指标在时空尺度的重要性程度。

3.2 子系统及耦合系统和谐度

3.2.1 水资源子系统

水资源、经济社会、生态环境子系统及三者耦合系统和谐度计算结果见图 2。由图 2(a)可知,各地州水资源子系统和谐程度在研究期内整体呈现上升趋势,但地区之间差异明显。其中,克州水资源子系统和谐程度相对较好,和谐度由 2007 年的 0.538(接近不和谐)增加到 2016 年的 0.661(较和谐),且 2014—2016 年均处于较和谐状态,这主要得益于地区降水丰富、产流模数较大、人均水资源量多。相对而言,阿克苏和喀什地区和谐程度均较差,和谐度在研究期内分别维持在 0.278 ~ 0.376 和 0.286 ~ 0.366,持续处于较不和谐状态,原因为水资源开发利用率高且用水技术水平相对落后。此外,巴州及和田地区和谐程度分列第二、三位,由于水资源量随机性的影响,其和谐度在研究期具有波动变化趋势。

3.2.2 经济社会子系统

由图 2(b)可知,和田地区和谐程度最差,和谐度介于 0.193 ~ 0.374,近年来虽逐渐提升,但仍处于较不和谐状态,主要制约指标为人均 GDP。与此同时,克州和喀什地区均由较不和谐上升为接近不和谐,且处于持续增长趋势。阿克苏地区和谐度则由 2007 年的 0.357(较不和谐)增加到 2016 年的 0.608(较和谐),研究期内跨越接近不和谐阶段,改善效果显著,主要得益于经济发展,城乡居民收入水

平迅速提升。由于巴州人口密度较低,经济发展受到一定程度的限制,在研究期内持续处于较不和谐状态,和谐度增长比例最小,仅为 28.1%。

3.2.3 生态环境子系统

由图 2(c)可以看出,2007—2016 年 5 地州生态环境改善效果显著。克州和谐度从 0.213 增长到 0.628,增幅最大约 195%,表明该地区节能减排、绿化建设等措施得到有效实施。巴州增幅最小为 68%,但其起点较高,2007 年几乎达到接近不和谐,研究期内实现了向较和谐状态的转变。整体而言,目前大部分地区处于较和谐状态且将继续提升,其中 2016 年阿克苏地区和谐度为 0.770,即将达到基本和谐状态。然而和田地区和谐程度仍较差,2016 年处于较不和谐状态,结合研究结果,该地区应重点关注降低万元 GDP 氨氮排放水平,避免水体环境污染,此外,植树造林及城市绿化等方面亦有待加强。

3.2.4 耦合系统

综合考虑 3 个子系统的和谐度计算得到耦合系统和谐度,见图 2(d)。由图 2(d)可知,在用水技术水平提升、经济社会发展、生态环境保护等多方面的综合作用下,各地区耦合系统和谐度整体处于持续提升状态。其中,巴州和谐度最好,和谐度在研究期内由 0.457 增长到 0.615,是目前唯一达到较和谐程度的地区。相对而言,和田地区各子系统及耦合系统和谐度偏低,且该地区人均水资源量不确定性较大,和谐度变化呈现略微波动趋势。时间尺度上,2012 年后各地区和谐度增长速度明显加快,推测与最严格水资源管理制度的实施有关。整体而言,目

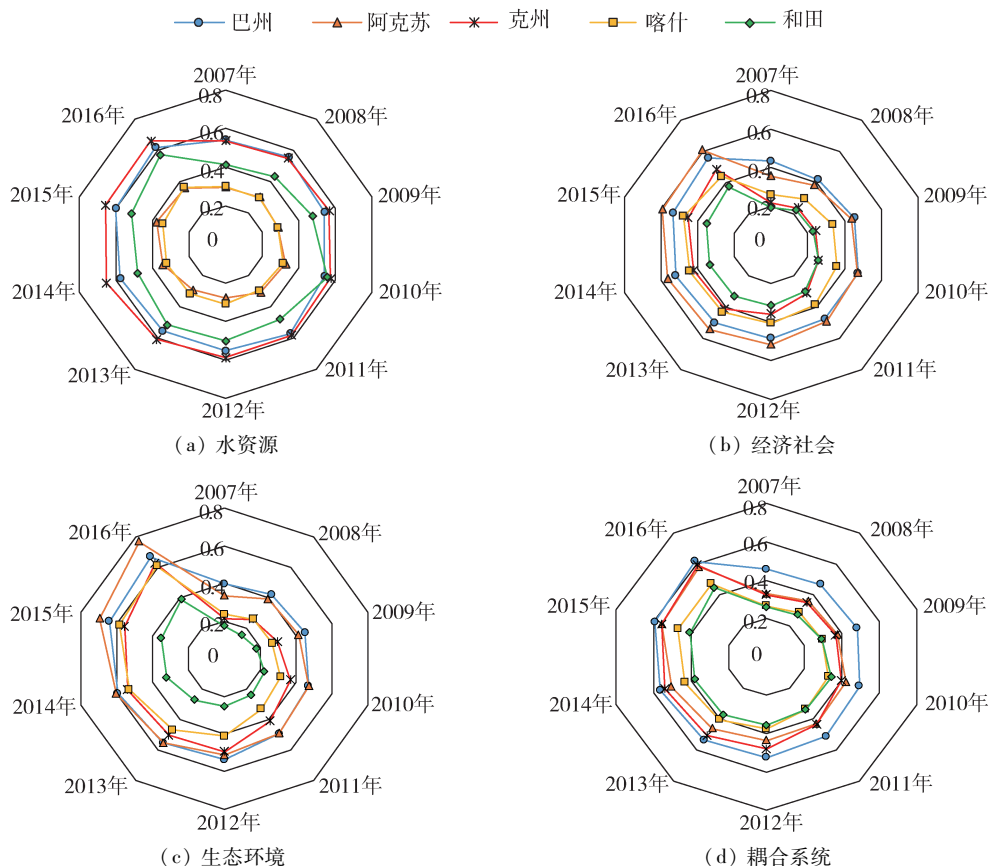


图2 5个地州系统和谐度计算结果

Fig.2 Calculation results of system harmony degree of five regions

前大多数地区处于接近不和谐状态,尚未出现基本和谐状态,5地州和谐度仍存在较大进步空间。

3.3 子系统贡献比例分析

基于上述和谐度量化结果,进一步探究各子系统对耦合系统和谐度的贡献率及其时空差异,结果见图3。由图3可知,3个子系统贡献比例变化趋势为:水资源系统总体呈现下降趋势且较为明显,其中巴州从55.4%下降到37.3%,侧面反映了其经济社会发展及生态环境保护成效显著,且能够较好协调三者关系以维持良好发展状态;经济社会系统无明显趋势,具体来说,阿克苏和喀什地区表现为先增后减,克州及和田地区虽为增加趋势但所占份额仍较小,巴州则处于平稳变动状态;生态环境系统呈现持续增加趋势,目前巴州、阿克苏和喀什地区均已超过水资源系统排在第一位,而和田地区在研究期内由22.3%增长为29.1%,增长速度略显缓慢。

空间维度上,不同地区的子系统对耦合系统和谐度的贡献率差异显著。如,克州及和田地区水资源系统持续起主导作用,原因为该地区水资源相对丰富,故下一步可依托其良好的水资源禀赋加快经济社会发展步伐,加大生态环境改善工作力度。相对而言,由于阿克苏地区绿化建设程度及城镇化率较高,本地水资源量不能满足其发展需求,水资源系

统和谐度较低,多年平均贡献率仅24.1%,研究期内经济社会和生态环境子系统起主要贡献作用。同样对于喀什地区,其水资源系统贡献率次序在研究期内由首位下降到末位,水资源条件同样将成为其和谐发展的制约因素。因此,上述地区应重点考虑从水资源优化配置、产业结构调整等方面入手研究以实现水资源的合理开发利用。

综上所述,各子系统对耦合系统和谐度的贡献率在时空维度上均存在明显差异,主要原因为各评价指标数值在研究期内的动态变化及地区差异性。因此,为实现区域协调发展,加快提升地区耦合系统和谐程度,各地州应相互借鉴先进经验,实现优势互补,在此基础上寻求符合自身水资源禀赋、社会现状、地理特征和区域特色的和谐发展模式。

3.4 促进地区和谐发展的对策

a. 水资源方面。各地州应依据水资源禀赋合理规划以满足其发展需求,对目前开发利用程度较高的阿克苏和喀什地区,考虑“开源”和“节流”两个方面,寻求新水源的同时加强节水宣传教育,提升各行业节水意识;塔里木河流域管理部门应统筹考虑流域水量分配,通过调水工程和水权交易等措施实现有限的水资源在五地州间的优化配置;此外,各地州均需加强对高耗水行业的管理,特别是阿克苏和

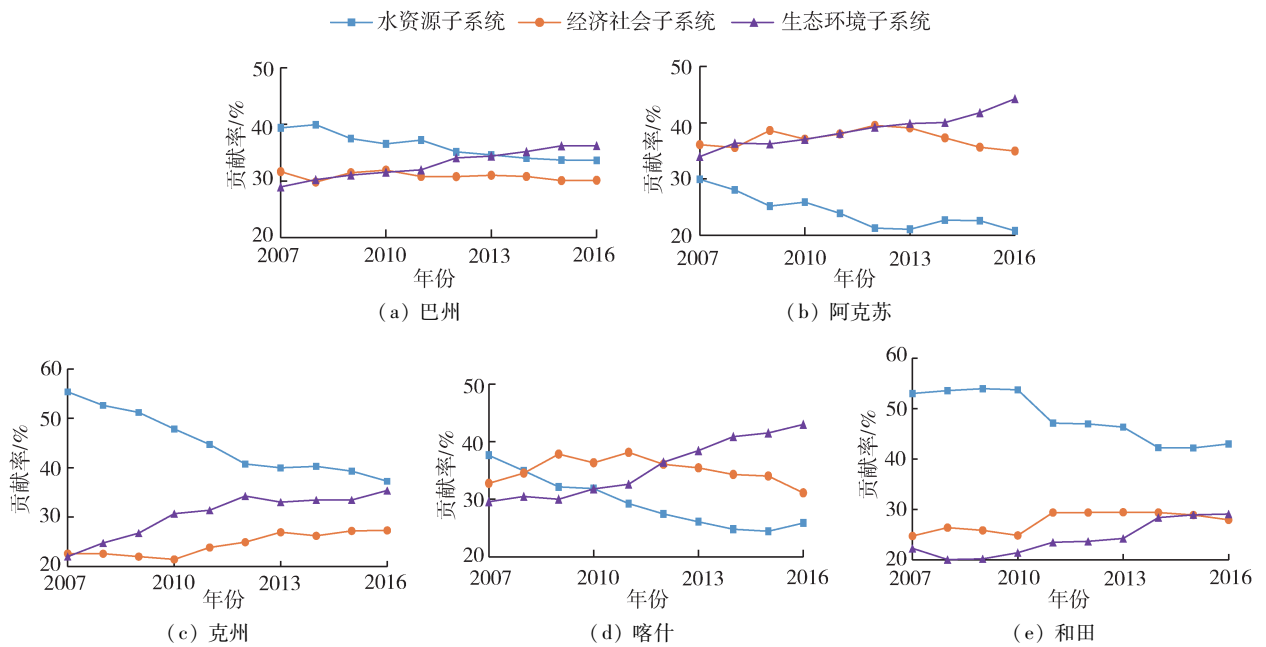


图3 子系统对耦合系统和谐度的贡献率

Fig.3 Contribution rate of subsystems to the coupled system's harmony degree

喀什地区,应注重引进先进用水技术,提升工农业用水技术水平。

b. 经济社会方面。改革经济社会发展模式,优化产业结构,考虑地区实际情况,政策引导增加第三产业所占份额,提升居民收入,尤其针对当前经济发展较为滞后的和田地区;巴州、阿克苏等地区应因地制宜,种植经济、耐旱、高产出作物,调整作物种植面积空间布局,保障粮食安全的同时提升经济效益;各地州均需合理调控地区人口密度,适当加快地区城市化进程,营造良好生活环境以满足居民美好生活需求。

c. 生态环境方面。加大污水处理设施投资,提升污水处理能力,严格把控污水排放标准,对水资源相对丰富的巴州、克州及和田地区,充分利用其水体自净能力;控制作物化肥、农药使用量,开发高效利用技术,控制污染传播范围以减少面源污染;提高污水废水回用率,保障地区生态用水,提高森林覆盖率和建成区绿化覆盖率,维持生态系统可持续性。

4 结 论

a. 各地州耦合系统和谐度在研究期内整体处于提升状态,提升幅度最大为克州,最小为巴州,目前大多数地区仍处于接近不和谐状态,5 地州耦合系统和谐度仍存在较大进步空间。

b. 耦合系统和谐度最好的地区为巴州,和谐度在研究期内由 0.457 增长到 0.615,在 2016 年首次达到较和谐,克州和阿克苏地区稍次之,相对而言,和田及喀什地区起步状态较差,各子系统及耦合系

统和谐度在研究期内持续呈现显著的滞后态势。

c. 各地州子系统对耦合系统和谐度的贡献率时空差异明显。时间维度上,水资源系统总体呈现下降趋势且较为明显,经济社会系统无明显趋势,生态环境系统呈现持续增加趋势;空间维度上,克州及和田地区水资源系统持续起主导作用,巴州和喀什地区在研究期内由水资源系统转为生态环境,而阿克苏地区则保持由经济社会和生态环境系统起主要贡献作用。

参考文献:

- [1] 左其亨,吴滨滨,张伟,等. 跨界河流分水理论方法及黄河分水新方案计算[J]. 资源科学,2020,42(1):37-45. (ZUO Qiting, WU Binbin, ZHANG Wei, et al. A method of water distribution in transboundary rivers and the new calculation scheme of the Yellow River water distribution [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 37-45. (in Chinese))
- [2] 闻豪,文凤.“一带一路”重点省份水资源-经济-生态环境耦合协调分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(10):870-877. (WEN Hao, WEN Feng. Coupling and coordination analysis of water resources-economy-ecological environment in key province of “the Belt and Road” [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(10): 870-877. (in Chinese))
- [3] 贡利,王婧,靳春玲,等. 基于和谐论的黄河兰州段河道采砂影响评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):34-39. (GONG Li, WANG Jing, JIN Chunling, et al. Impact assessment of river sand mining in Lanzhou reach of Yellow River based on harmony theory [J]. Water

- Resources Protection,2020,36(4):34-39. (in Chinese))
- [4] 左其亭,张志卓,吴滨滨,等. 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 Binin, et al. 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))
- [5] 黄德春,任也平,张长征. 强度-总量控制下的水资源利用效率对人水和谐的影响[J]. 水利经济,2019,37(2):1-7. (HUANG Dechun, REN Yeping, ZHANG Changzheng. Effect of utilization efficiency of water resources on human-water harmony under intensity-total control [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019,37(2):1-7. (in Chinese))
- [6] LUO Zengliang,ZUO Qiting. Evaluating the coordinated development of social economy, water, and ecology in a heavily disturbed basin based on the distributed hydrology model and the harmony theory[J]. Journal of Hydrology, 2019,574:226-241.
- [7] 刘志明,周召红,王永强,等. 区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究[J]. 人民长江,2019,50(3):145-150. (LIU Zhiming,ZHOU Zhaohong,WANG Yongqiang, et al. Study on comprehensive evaluation of regional water resources carrying capacity and its development sustainability [J]. Yangtze River,2019,50(3):145-150. (in Chinese))
- [8] 孟珍珠,唐德善,魏宇航,等. 和谐论在水资源承载力综合评价中的应用[J]. 水资源保护,2016,32(3):54-58. (MENG Zhenzhu, TANG Deshan, WEI Yuhang, et al. Application of harmony theory to evaluation of water resources carrying capacity [J]. Water Resources Protection,2016,32(3):54-58. (in Chinese))
- [9] 刘蛟,李涛,刘晓辉,等. 基于不同发展模式的地区水安全评价分析[J]. 水力发电,2020,46(4):6-9. (LIU Jiao, LI Tao, LIU Xiaohui, et al. Evaluation and analysis of regional water security based on various development pattern [J]. Water Power,2020,46(4):6-9. (in Chinese))
- [10] 罗勇,王乐志,傅春,等. 基于主客观耦合的区域水资源综合利用效率评价[J]. 人民长江,2019,50(12):80-84. (LUO Yong,WANG Lezhi,FU Chun, et al. Evaluation of regional water resources comprehensive utilization efficiency based on subjectivity and objectivity coupling [J]. Yangtze River,2019,50(12):80-84. (in Chinese))
- [11] 黄霄,雷晓云,高凡,等. 奎屯河流域健康评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):97-104. (HUANG Xiao, LEI Xiaoyun,GAO Fan, et al. Watershed health assessment of Kuitun River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020,36(2):97-104. (in Chinese))
- [12] 陈磊,梁新平. 基于改进综合赋权法的塔里木河流域“三源一干”水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2019(1):72-75. (CHEN Lei, LIANG Xiping. Evaluation on WRCC of three source streams and one mainstream in Tarim River Basin based on improved comprehensive weighting method [J]. Water Saving Irrigation,2019(1):72-75. (in Chinese))
- [13] 马忠,苏守娟,龙爱华,等. 塔里木河流域社会经济系统水循环分析[J]. 地球科学进展,2018,33(8):833-841. (MA Zhong, SU Shoujuan, LONG Aihua, et al. Water cycle analysis of social and economic system in Tarim River Basin [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(8):833-841. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 刘向东,龙爱华,张沛. 基于生态足迹的塔里木河流域可持续发展研究[J]. 水利水电技术,2019,50(12):38-48. (LIU Yundong, LONG Aihua, ZHANG Pei. Sustainable development of Tarim River Basin based on ecological footprint [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(12):38-48. (in Chinese))
- [16] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报,2008,39(4):440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(4):440-447. (in Chinese))
- [17] 左其亭,庞莹莹. 基于和谐论的水污染物总量控制问题研究[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):1-5. (ZUO Qiting,PANG Yingying. Total amount control problems of water pollutants based on harmony theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011,31(3):1-5. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 薛联青,王晶,魏光辉. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):13-19. (in Chinese))
- [20] 史树洁,左其亭,王亚迪. 襄阳市河湖水系-经济社会发展和谐量化分析[J]. 水电能源科学,2017,35(3):35-39. (SHI Shujie, ZUO Qiting, WANG Yadi. Quantitative

- Analysis of harmony between river-lake water system and socio-economic development in Xiangyang City[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 35-39. (in Chinese))
- [21] 刘平清, 张鹏宁, 宝权. 基于改进 CRITIC-G1 的混合交叉赋权与 TOPSIS 模型的节水灌溉项目优选[J]. 节水灌溉, 2019(12): 106-109. (LIU Pingqing, ZHANG Pengning, BAO Quan. Optimal selection of water saving irrigation project based on hybrid cross-weighting and TOPSIS model under improved CRITIC-G1 method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 106-109. (in Chinese))
- [22] 陈海涛, 徐嘉豪. 基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 48-53. (CHEN Haitao, XU Jiahao. Evaluation of water resources carrying capacity in Henan Province based on entropy-weight fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 48-53. (in Chinese))
- [23] 胡泉光, 陈方明, 宁光忠. CW-TOPSIS 岩爆评判模型及应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 20-25. (HU Quanguang, CHEN Fangming, NING Guangzhong. Rockburst evaluation model and application of CW-TOPSIS[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(2): 20-25. (in Chinese))
- [24] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012. (收稿日期: 2020-06-27 编辑: 王 芳)
-
- (上接第 54 页)
- [12] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学, 2004(6): 104-110. (WANG Shunjiu, YANG Zhifeng, DING Jing. Projection pursuit method for comprehensive evaluation of groundwater resource carrying capacity in Guanzhong plain [J]. Resources Science, 2004(6): 104-110. (in Chinese))
- [13] 陈守煜, 胡吉敏. 地下水资源承载能力评价模糊可变模型与方法[J]. 水资源保护, 2006(6): 1-5. (CHEN Shouyu, HU Jimin. Fuzzy variable model and method for evaluation of groundwater resources carrying capacity[J]. Water Resources Protection, 2006(6): 1-5. (in Chinese))
- [14] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [15] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [16] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价: 基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(4): 60-66. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the belt and road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-Malmquist-Tobit model [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Socail Sciences), 2018, 20(4): 60-66. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Research on the harmonious balance of water resources and economic society [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))
- [18] 谢新民, 李丽琴, 周翔南, 等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))
- [19] 孙宝林, 魏琳, 杨瑾, 等. 新疆地下水资源量及开采潜力分析[J]. 地下水, 2005(4): 266-267. (SUN Baolin, WEI Lin, YANG Jin, et al. Analysis of groundwater resources and exploitation potential in Xinjiang [J]. Groundwater, 2005(4): 266-267. (in Chinese))
- [20] 吴孝天, 管华. 郑州市经济发展与水资源环境耦合关系研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(1): 72-75. (WU Xiaotian, GUAN Hua. Study on the coupling relationship between economic development and water resources environment in Zhengzhou [J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2016, 34(1): 72-75. (in Chinese))
- [21] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003(4): 43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Analysis, forecast and evaluation of water resources carrying capacity in Northwest China [J]. Resources Science, 2003(4): 43-48. (in Chinese))
- [22] 贺可, 吴世新, 杨怡, 等. 近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1333-1340. (HE Ke, WU Shixin, YANG Yi, et al. Land use and oasis dynamic changes in Xinjiang in recent 40 years [J]. Geography of Arid Areas, 2018, 41(6): 1333-1340. (in Chinese))
- (收稿日期: 2020-06-27 编辑: 王 芳)