

关中地区水资源承载力时空演变特征及耦合协调性

贾琼¹, 宋孝玉¹, 宋淑红², 覃琳¹, 刘辉¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省水文水资源勘测中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 为明确陕西省关中地区水资源与区域发展协调程度,综合运用变化参数可变模糊评价模型、空间自相关分析和耦合协调发展模型,对2010–2019年关中地区水资源承载力及子系统间耦合协调度的时空演变进行了定量评价和全面分析。结果表明:由于生态环境保护力度加大与产业结构合理性提高,2010–2019年关中地区水资源承载力呈不规则“M”型波动上升,均处于Ⅲ级临界状态;经济、社会及生态环境子系统承载力水平差异化增大,水资源子系统承载力滞后性突出,且呈波动下降趋势;空间分布呈“南强北弱”特征,集中于临界和较弱两种承载状态,空间差异性呈波动增大,且以2018年为拐点,差异性由不显著变为显著;咸阳市、渭南市水资源承载力较低,分别是由水质污染严重、水资源利用效率不高所致;水资源、经济、社会及生态环境子系统耦合协调程度呈波动上升趋势,期间增幅为16.3%,均为中度协调状态;城市间差异逐渐减小,其中西安市、铜川市和宝鸡市的耦合协调程度相对较高;水资源承载力主要影响因素依次为水功能区水质达标率、供水模数、农田灌溉水有效利用系数和城镇化率。研究结果可为可持续协调发展框架下区域水资源规划与管理提供参考。

关键词: 水资源承载力; 可变模糊识别; 空间自相关; 耦合协调发展; 关中地区

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0066-09

Temporal and spatial evolution characteristics and coupling coordination of water resources carrying capacity in Guanzhong region

JIA Qiong¹, SONG Xiaoyu¹, SONG Shuhong², QIN Lin¹, LIU Hui¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Hydrology and Water Resources Survey Center, Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to clarify the coordination degree of water resources and regional development in Guanzhong region, the quantitative evaluation and comprehensive analysis of the spatio-temporal evolution of the water resources carrying capacity and the coupling coordination degree of the subsystems of water resources, society, economy and ecological environment in Guanzhong region from 2010 to 2019 were carried out using variable parameter fuzzy evaluation model, spatial autocorrelation analysis and coupling coordination development model. The results show that the carrying capacity of water resources in Guanzhong region showed an fluctuated upward trend with an M-shaped curve, all the cities were at a critical state of grade Ⅲ. The carrying capacity of society, economy and ecological environment differentiated greatly, and the water resources subsystem lagged behind and fluctuated downward. The spatial distribution of water resources carrying capacity was characterized by “strong in the south and weak in the north”, and most cities were in critical or weak state. The spatial difference increased with fluctuations and changed from insignificant to significant with 2018 as the turning point. Among the cities, Xianyang and Weinan had low water resources carrying capacity, which was caused by serious water pollution and low water resources utilization efficiency, respectively. The coupling and coordination degree of water resources, society, economy and ecological environment showed a fluctuating upward trend, with a growth

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400301)

作者简介: 贾琼(1997–), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 宋孝玉(1971–), 女, 陕西安康人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。

rate of 16.3% during the period, which was recognized as moderate coordination state. The difference between cities gradually decreased, and Xi'an, Tongchuan and Baoji reached a relatively high degree of coupling and coordination. The main influencing factors of water resources carrying capacity were the water quality compliance rate in the water function area, water supply modulus, effective utilization coefficient of farmland irrigation water and urbanization rate. The research results can provide a reference for regional water resources planning and management under the framework of sustainable and coordinated development.

Key words: water resources carrying capacity; variable fuzzy recognition; spatial autocorrelation; coupling and coordinated development; Guanzhong region

1 研究背景

我国水资源面临着资源约束趋紧、环境污染严重及生态系统退化的严峻形势,自然资源有限性和需求无限性的矛盾日益凸显^[1]。在这样的背景下,我国将水生态文明建设纳入国家安全领域,全面推进以水资源承载能力评价为基本组成部分的“双评价”工作的开展,引导和约束各地严格按照水资源承载能力谋划经济社会发展^[2]。水资源对经济社会发展具有支撑和约束双重作用,探讨可持续发展问题必须考虑水资源承载力^[3]。

关中地区是陕西省经济中心和人口密集区,也是全省水资源供需矛盾最为突出的地区,区域水资源保障能力一直受到各级政府和专家学者的高度重视。“十三五”时期,陕西省制定了“关中留水”治水方略,在全省范围内开展建立水资源承载能力监测预警机制工作,并将构建关中骨干水系网络格局列入“十四五”水利发展规划。目前,在关中地区水资源承载力的研究方面已取得了一些成果,但已有研究大多聚焦于渭河流域^[4-5]、陕西省全域^[6-7]及各地级市尺度^[8],且没有探讨水资源承载系统内部的耦合协调度问题,而揭示其最近几年时空演变特征的研究更为鲜见。关中地区作为带动陕西发展的重要空间载体,全面掌握该地区水资源承载力及子系统间耦合协调度时空演变的最新特征,是推进该地区水资源-经济-社会-生态环境协调发展的前提条件,更是制定可持续发展框架下区域规划的基础性工作。

近年来,关中地区降水量总体呈减少趋势,水资源量因受降雨影响显著亦呈减少趋势^[9]。在人口和产业快速集聚式发展背景下,渭河部分河段的水体污染、地下水超采及水土流失等问题日趋严重,水资源承载形势整体较为严峻^[10]。为此,本文综合运用可变模糊评价模型、空间自相关分析和耦合协调发展模型,对2010-2019年关中地区水资源承载力及其耦合协调度进行了定量评价,并全面分析了其时空演变

特征,以期优化地区经济结构和水资源配置方式,按水资源承载力谋划可持续协调发展提供参考。

2 数据来源和研究方法

2.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,北接黄土高原,南倚秦岭山脉,西起宝鸡市,东至渭南市,面积约为 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,共包括5个城市,其地理位置如图1所示。关中地区地处黄河流域下游,属暖温带半湿润半干旱气候,多年平均降雨量为525.7 mm,渭河由西向东从中穿过,区域内地表水因含沙量高而难以被利用,地下水是其主要供水水源^[11]。2019年关中地区GDP总量为 1.59×10^{12} 元,常住人口为 2440×10^4 ,水资源量为 $81.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,人均水资源量为 334.0 m^3 ,以仅占全省17%的水资源量承担着全省61%的人口和63%的经济总量。可见,关中地区作为陕西省的经济中心和人口密集区,其水资源却相对匮乏且时空分布不均,人均水资源量不足全国平均水平的1/3。

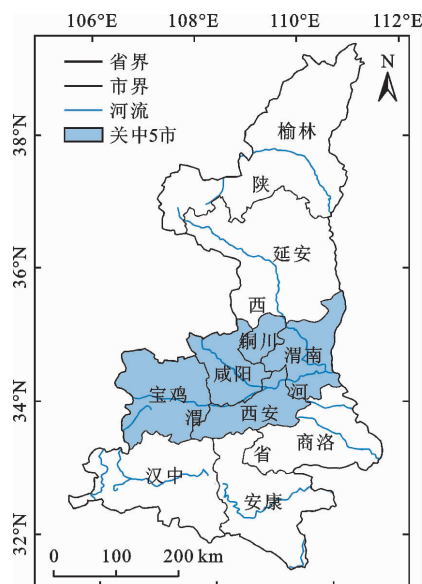


图1 陕西省关中地区地理位置

2.2 数据来源

经济与人口数据来源于《陕西省统计年鉴》(2010–2019 年)、关中地区各城市《国民经济与社会发展统计公报》(2010–2019 年);水资源数据来源于《陕西省水资源公报》(2010–2019 年);环境保护原始数据来源于《中国城市统计年鉴》(2010–2019 年);行政区划矢量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 审图号为 GS(2019)1822。

2.3 研究方法

2.3.1 评价指标体系构建与分级 水资源承载力评价指标体系是水资源承载力关键影响因子的集合,构建时应遵循科学性、全面性和数据可获取性等原则^[12],并充分考虑不同地区水资源的自然条件和开发利用的实际情况。基于此,本文按照层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)思想,从目标层、准则层和指标层 3 层结构出发,构建关中地区水资源承载力评价指标体系,如图 2 所示。

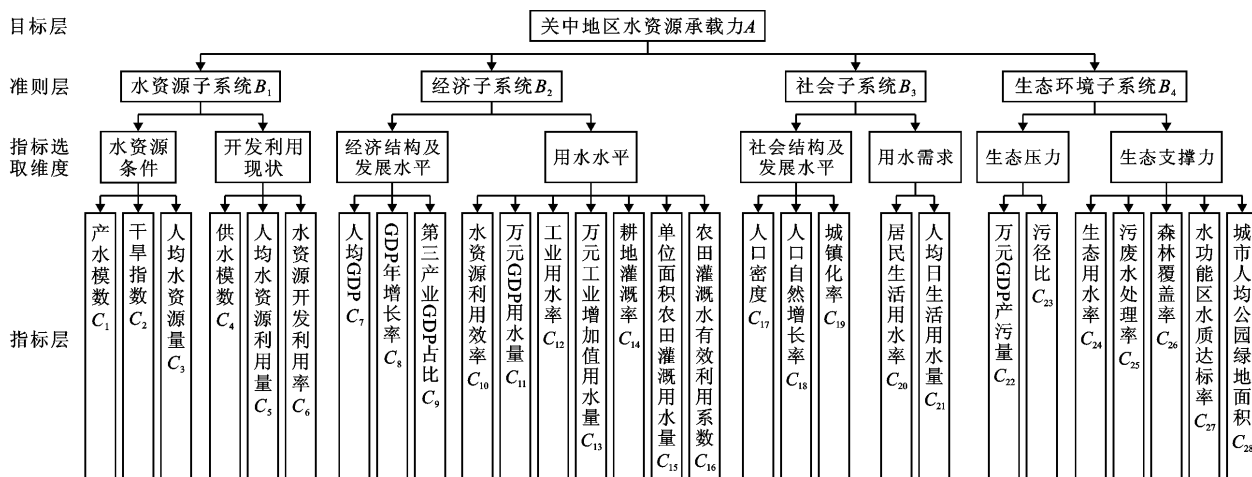


图2 关中地区水资源承载力评价指标体系

关中地区水资源承载力评价指标体系中,目标层为水资源承载力,是指标体系建立的最终目标;准则层包括水资源、经济、社会和生态环境 4 个子系统,是根据系统原理对水资源承载力系统的划分;结合关中地区水资源的自然条件和开发利用的实际情况,全面分析水资源承载力影响因素和以水资源为纽带的子系统间的相互关系,参考全国水资源供需分析指标体系及相关研究成果^[4-5]中使用频率较高的指标,分别从 4 个子系统中选取评价指标,共 28 个,组成指标层。

结合关中地区水资源条件及经济社会发展对水资源的需求与保护目标,参考《用水指标评价导则》《全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修改稿)》等相关国家规范及标准和已有研究^[13-14],按对水资源承载力的影响程度,将评价指标划分为 5 个等级:Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ级,分别对应水资源承载力的极强、较强、临界、较弱和极弱状态,分级标准如表 1 所示。

2.3.2 指标权重的确定 权重是评价指标对水资源承载力影响程度的量化表达,采用综合赋权法^[15]确定。该方法综合了主观经验和指标数据的客观信

息,能够避免单一赋权法的缺陷,使指标权重更加合理。首先,本文根据层次分析法^[16]与熵权法^[17]分别确定主、客观权重,再按照乘法集成原则将二者结合,得到综合权重,计算公式为:

$$w_i = \frac{a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i b_i} \quad (1)$$

式中: w_i 为指标*i*的综合权重; a_i 为指标*i*的层次分析法权重; b_i 为指标*i*的熵权法权重。

2.3.3 可变模糊评价模型 可变模糊评价模型^[18]是以工程模糊集合论为基础的综合评价方法,其核心是通过相对隶属度来描述模糊概念的中介过渡性,采用该模型进行水资源承载力评价的步骤见文献^[19],此处不再赘述。本文为提高评价结果的合理性与可靠性,基于模型优化准则参数 α 和距离参数 p 取值的不同组合,通过变化参数变换模型,并采用综合级别特征值 $\bar{H}$ 评定水资源承载力等级,其计算公式为:

$$\bar{H} = \sum_{j=1}^4 H_j / 4 \quad (2)$$

式中: $\bar{H}$ 为综合级别特征值; $j=1,2,3,4$,表示参数 α 和 p 的 4 种组合,分别为:① $\alpha=1, p=1$ 、② $\alpha=1$,

$p = 2$ 、③ $\alpha = 2, p = 1$ 和 ④ $\alpha = 2, p = 2$; H_j 为第 j 种组合的级别特征值。

在评定水资源承载力等级时,对应前文将综合级别特征值 $\bar{H}$ 划分为 5 个等级区间^[19],如表 2 所示。

表 1 水资源承载力评价指标分级标准

目 标 标准层 层	指标层	类型	计算方法	分级标准				
				I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级
B ₁	$C_1/10^4(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	水资源总量 / 区域面积	> 60	35 ~ 60	20 ~ 35	15 ~ 20	< 15
	C_2	-	年蒸发量 / 年降水量	< 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 4.0	> 4.0
	C_3/m^3	+	水资源总量 / 常住人口总数	> 2200	1500 ~ 2200	500 ~ 1500	120 ~ 500	< 120
	$C_4/10^4(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	-	供水总量 / 区域面积	< 1	1 ~ 3	3 ~ 10	10 ~ 15	> 15
	C_5/m^3	-	用水总量 / 常住人口总数	< 100	100 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 300	> 300
	$C_6/\%$	-	供水总量 / 水资源总量	< 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	> 80
	$C_7/10^4$ 元	+	统计数据	> 7.74	2.50 ~ 7.70	0.66 ~ 2.50	0.30 ~ 0.66	< 0.30
	$C_8/\%$	-	统计数据	< 4	4 ~ 7	7 ~ 12	12 ~ 15	> 15
	$C_9/\%$	+	统计数据	> 70	50 ~ 70	40 ~ 50	30 ~ 40	< 30
	$C_{10}/\%$	-	耗水量 / 用水总量	< 10	10 ~ 25	25 ~ 40	40 ~ 60	> 60
B ₂	C_{11}/m^3	-	用水总量 / GDP 总量	< 30	30 ~ 90	90 ~ 150	150 ~ 200	> 200
	$C_{12}/\%$	-	工业用水量 / 用水总量	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 30	> 30
	C_{13}/m^3	-	工业用水量 / 工业增加值	< 10	10 ~ 25	25 ~ 40	40 ~ 55	> 55
	$C_{14}/\%$	+	耕地灌溉面积 / 耕地总面积	> 65	50 ~ 65	35 ~ 50	20 ~ 35	< 20
	$C_{15}/10^4(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	-	统计数据	< 30	30 ~ 45	45 ~ 65	65 ~ 90	> 90
	C_{16}	+	统计数据	> 0.8	0.7 ~ 0.8	0.6 ~ 0.7	0.5 ~ 0.6	< 0.5
	$C_{17}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	常住人口总数 / 区域面积	< 100	100 ~ 400	400 ~ 700	700 ~ 1000	> 1000
	$C_{18}/\%$	-	统计数据	< 2	2 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20
B ₃	$C_{19}/\%$	+	统计数据	> 80	80 ~ 60	40 ~ 60	40 ~ 20	< 20
	$C_{20}/\%$	-	城镇人口数 / 常住人口总数	< 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	> 25
	$C_{21}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	-	统计数据	< 80	80 ~ 100	100 ~ 120	120 ~ 140	> 140
	C_{22}/m^3	-	污水排放总量 / GDP 总量	< 10	10 ~ 15	15 ~ 40	40 ~ 55	> 55
	$C_{23}/\%$	-	污水排放总量 / 年径流量	< 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20
	$C_{24}/\%$	+	生态环境用水量 / 用水总量	> 5	3 ~ 5	2 ~ 3	1 ~ 3	< 1
B ₄	$C_{25}/\%$	+	统计数据	> 95	95 ~ 80	65 ~ 80	50 ~ 65	< 65
	$C_{26}/\%$	+	统计数据	> 50	40 ~ 50	20 ~ 40	10 ~ 20	< 10
	$C_{27}/\%$	+	统计数据	> 90	80 ~ 90	70 ~ 80	60 ~ 70	< 60
	C_{28}/m^2	+	统计数据	> 60	30 ~ 60	10 ~ 30	5 ~ 10	< 5

表 2 水资源承载力等级评定标准

$\bar{H}$	等级	承载状态	内涵
[0,1.5]	I级	极强	承载力极强,水资源处于充裕状态,是区域发展的优势资源
(1.5,2.5]	Ⅱ级	较强	承载力较强,水资源具有进一步开发利用的潜力
(2.5,3.5]	Ⅲ级	临界	承载力一般,基本能够满足区域发展对水资源的需求
(3.5,4.5]	Ⅳ级	较弱	承载力较弱,仅能满足生产、生活及生态的最低需水要求
[4.5,5.0]	V级	极弱	承载力极弱,水资源处于匮乏状态,是区域良性发展的限制性因素

2.3.4 空间自相关 空间自相关分析能够揭示具有空间异质属性的研究数据在空间分布上的关联性,包括全局空间自相关和局部空间自相关。全局空间自相关用于揭示研究数据在区域整个范围内的空间分布特征,常用全局 Moran 指数 I (Moran's I) 表示。当 $I > 0$ 时,表明研究数据具有正向关联性,即相关性,呈空间聚集特征;当 $I < 0$ 时表明研究数据具有负向关联性,即差异性,呈空间离散特征;当 $I = 0$ 时,表明研究数据空间分布呈随机性。而局部空间自相关常通过局部 Moran 指数 I_i 聚类地图即 LISA (localization international standard association) 聚类地图直观反映区域内部各相邻单元间的关联性^[20-21]。

本文为识别关中地区城市间水资源承载力是否相互影响,首先以关中 5 市为基本单元,利用空间数据分析软件 Geoda 1.16 构造空间权重矩阵,计算水资源承载力全局 Moran 指数 I 和局部 Moran 指数 I_i ,并绘制 LISA 聚类地图。再在 0.1 的置信水平上根据 P 值检验关联性是否显著,若 $P < 0.1$,则通过显著性检

验,表明水资源承载力空间分布关联性显著,否则不显著。

2.3.5 耦合协调发展模型 耦合协调发展模型将耦合度和协调发展指数相结合,综合衡量系统或元素间相互影响和协调程度^[22]。为分析关中地区水资源承载力四元系统的耦合协调性,参考已有研究成果^[24],构建耦合协调发展模型如下:

$$C = \frac{(B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot B_4)^{\frac{1}{4}}}{(B_1 + B_2 + B_3 + B_4)/4} \quad (3)$$

$$T = \alpha B_1 + \beta B_2 + \gamma B_3 + \lambda B_4 \quad (4)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (5)$$

式中: C 为耦合度; B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 分别代表水资源子系统、经济子系统、社会子系统和生态环境子系统的水资源承载力; T 为协调发展指数; α 、 β 、 γ 和 λ 为待定系数,本文认为各水资源承载力子系统同等重要,故取 $\alpha = \beta = \gamma = \lambda = 1/4$; D 为耦合协调度,对应的协调状态如表 3 所示^[23]。

表 3 耦合协调程度等级划分

耦合协调度 D	[0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1]
协调程度	严重失调	轻度失调	一般协调	中度协调	高度协调

3 结果与分析

3.1 用水量情况分析

根据《陕西省水资源公报》统计 2010—2019 年关中地区各部门用水量并绘制变化趋势图,如图 3 所示,从总量和结构两方面分析关中地区的用水情况。

由图 3 可知,2010—2019 年关中地区用水总量呈波动增加趋势。由 2010 年的 $48.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2019 年的 $51.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均增加 $0.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。关中地区用水总量的增加,一方面是发展规模扩大、人口数量增加的必然结果,另一方面也体现了随着关中地区“四横十纵”水网网络及水资源配套挖潜工程的逐步建设,区域水资源供给能力得到不断提升。

将关中地区用水划分为农业、工业、生活及生态用水 4 类,分析用水结构变化。2010—2019 年关中地区对用水比例进行了大规模的调整,农业、工业、生活、生态用水比例分别由 2010 年的 63.3%、16.4%、18.6%、1.7%,调整为 2019 年的 53.9%、16.4%、22.7%、7.0%。作为关中地区最大的用水部门,农业用水量呈波动减少趋势,10 年间累积减少量达 $3.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,用水比例也被逐年压缩;而工业、生活和生态

用水量则呈不同程度的增大趋势,其中生态用水量增加最明显,增加量为 $2.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,增幅高达 239%,用水比例也由 2010 年的 1.7% 上升到 2019 年的 7.0%;工业用水量变化幅度最小,增加量仅为 $0.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,用水比例也比较稳定,在 16.2%~17.5% 范围内波动。

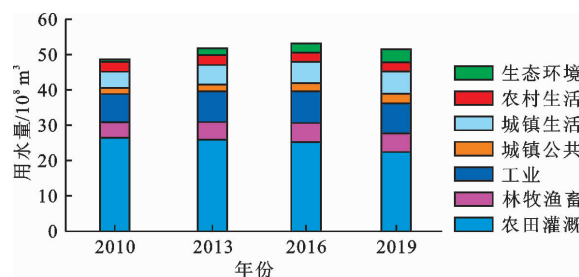


图 3 2010—2019 年关中地区用水量及用水结构变化

3.2 水资源承载力时序变化

运用变化参数下的可变模糊识别模型,计算得到 2010—2019 年关中地区水资源承载力系统和各子系统的综合级别特征值,结果如图 4 所示。

由图 4 中水资源承载力系统来看,2010—2019 年综合级别特征值呈“W”型波动下降。

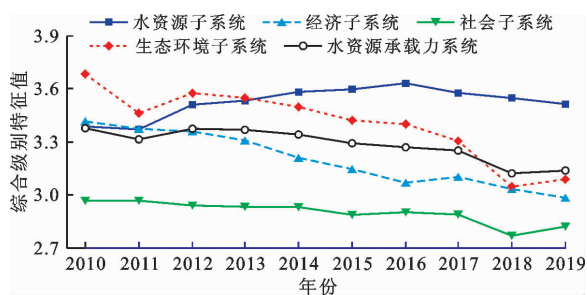


图4 2010—2019年关中地区水资源承载力和各子系统的综合级别特征值

由综合级别特征值与承载状态关系可知,综合级别特征值越大,对应的水资源承载状态越弱,二者变化趋势相反,因而研究时段关中地区水资源承载力呈不规则“M”型波动上升,期间增幅为7.3%。分析评价指标数据发现,研究时段内关中地区人均水资源占有量减少了28.2%,但生态环境用水率增加了174.8%、第三产业GDP占比提高了28.3%、人口自然增长率下降了17.1‰,说明生态环境保护力度的加大与产业结构合理性的提高,能够在一定程度上弥补水资源先天条件的不足,使水资源承载水平朝着较好的方向发展。从承载状态看,研究时段内综合级别特征值均介于2.5~3.5之间,表明水资源一直处于Ⅲ级临界承载状态,说明研究区虽然位于资源型缺水的

西北地区,水资源禀赋条件存在一定缺陷,加之人口与经济聚集式发展,水资源承载状态长期较弱,但基本能满足生产、生活及生态最低需求要求,水资源承载力并未成为区域良性发展的限制性因素。

由图4中各子系统看,四元子系统承载力水平及其发展趋势均存在较大差异。(1)水资源子系统综合级别特征值在2010—2019年波动上升,平均综合级别特征值在各子系统中最大(为3.53),表明水资源子系统承载力水平不仅滞后性特点突出,而且呈波动下降趋势。这可能与降雨量变化有关。关中地区水资源量受降雨影响显著^[9],而2010—2019年该地区降水量总体呈减少趋势,累积减少量为 $16.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,导致水资源承载力有所下降。(2)经济、社会及生态环境子系统综合级别特征值表现出不同程度的下降趋势,即这3个子系统的承载力水平有差异化提升。表明关中地区实施的最严格水资源管理制度、节水技术推广和“两屏、一带、多廊、多点”生态安全格局的逐步构建,对提高经济、社会及生态子系统的承载力发挥了积极作用。

3.3 水资源承载力空间变化

3.3.1 空间分布特征 为分析2010—2019年关中地区各城市水资源承载力的变化,利用ArcGIS 10.2软件绘制水资源承载力空间分布图,如图5所示。

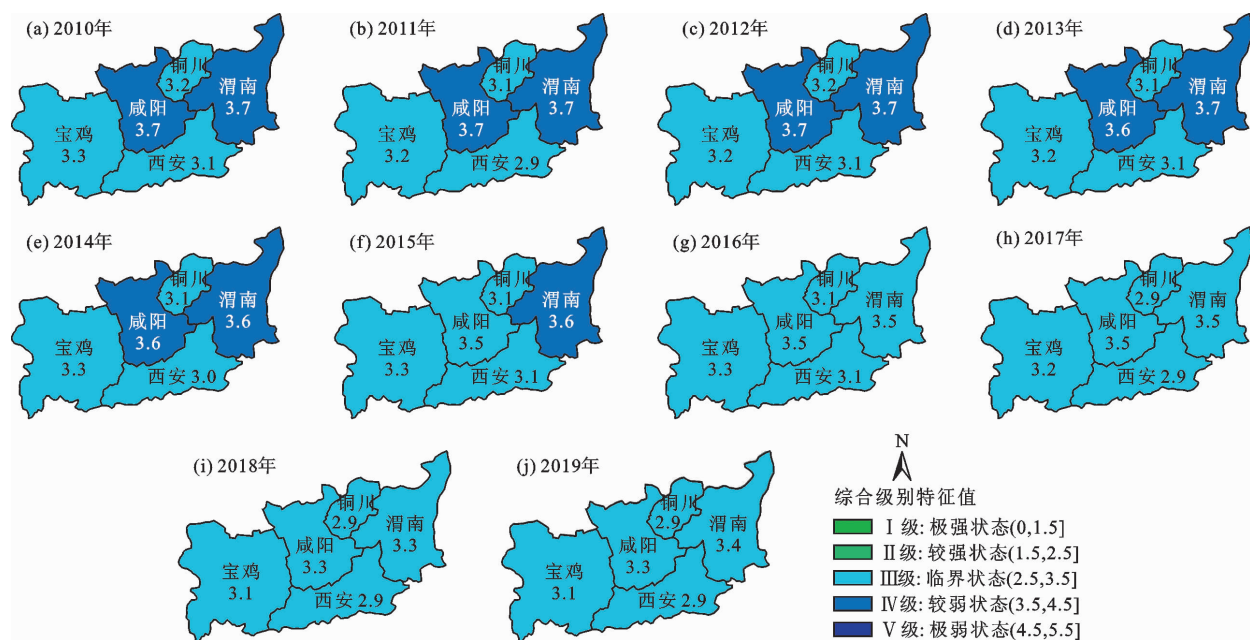


图5 2010—2019年关中地区水资源承载力空间分布

由图5可知,2010—2019年关中地区各城市水资源承载力集中于临界和较弱两种状态,城市间差异较小。空间分布整体呈“南强北弱”特征,这与关中地区

水资源量“南多北少”的空间差异具有一致性,说明水资源禀赋条件是关中地区水资源承载力的重要影响因素。咸阳市和渭南市水资源承载状态较弱,研究时

段平均综合级别特征值分别为 3.54 和 3.59。咸阳市 2010–2019 年年平均人均水资源量 (123.9 m^3) 不足关中地区 (334.0 m^3) 的 1/2, 而污径比 (0.41) 却约为关中地区整体水平 (0.21) 的 2 倍, 受水资源短缺与水质污染严重共同影响, 咸阳市水资源承载力较低。渭南市人均水资源量为 192.6 m^3 , 低于关中地区整体水平, 万元 GDP 用水量为 122.36 m^3 , 而关中地区平均仅为 61.12 m^3 , 水资源短缺加之利用效率较低, 使得渭南市水资源承载力也较差。

3.3.2 全局自相关分析 为揭示关中地区各城市间水资源承载力的相关关系, 以地级市为空间单元, 以综合级别特征值为变量, 借助 Geoda 1.16 软件进行单变量全局自相关分析, 得到 2010–2019 年关中地区水资源承载力全局 Moran's I 指数及 P 值检验, 如表 4 所示。

由表 4 可知: (1) 2010–2019 年关中地区水资源承载力全局 Moran's I 指数均小于 0。表明水资源承载力在整个区域范围内呈空间负相关, 即相距越近的城市, 水资源承载水平越不相同, 表现出空间差异性; Moran's I 指数呈波动减小, 表明空间差异性呈波动增大。(2) 2010–2017 年 P 值大于 0.1, 未通过置信水平为 0.1 的显著性检验; 2018–2019 年 P 值小于 0.1, 通过显著性检验。表明以 2018 年为拐点, 关中

地区城市间水资源承载力的差异性由不显著变为显著。究其原因, 首先关中地区水资源自然条件空间分布存在先天差异, 影响了各城市本底水资源承载力, 加之城市间经济社会发展程度不同, 用水需求与效率差异性逐渐显现, 使得空间分布差异性呈增大趋势。

表 4 关中地区水资源承载力全局自相关 Moran's I 指数及 P 值检验

年份	Moran's I	P
2010	-0.467	0.256
2011	-0.447	0.306
2012	-0.431	0.289
2013	-0.447	0.284
2014	-0.550	0.150
2015	-0.562	0.111
2016	-0.567	0.114
2017	-0.554	0.166
2018	-0.573	0.062
2019	-0.569	0.038

3.3.3 局部自相关分析 为进一步探索各相邻城市间水资源承载力的相关关系, 借助 Geoda 1.16 软件进行单变量局部自相关分析, 得到 2010–2019 年关中地区水资源承载力 LISA 聚类地图, 如图 6 所示。



图 6 2010–2019 年关中地区水资源承载力 LISA 聚类地图

由图 6 可知, 西安市和铜川市在研究时段内的聚集类型均为高–低模式, 说明这两个城市的水资源承载力高, 而与其邻近城市的水资源承载力低; 咸阳市 2011 年聚集类型为低–高模式, 说明其水资源承载力较其邻近城市的水资源承载力低, 其余年份聚集特征不明显; 宝鸡市和渭南市在研究时段内水资源承载力均未表现出显著的聚集性特征。铜川市位于关中地区最北部, 水资源量相对于邻近城市较为匮乏, 但其工业、农业及生活用水在陕西省乃至全国均处于较高水平^[24], 因此在研究时段内该市水资源承载力较邻近城市高。西安市综合用水水平自 2011 年后呈持续上升趋势, 水循环逐渐转化为健康状态^[25], 使其水资源承载力逐渐高于周围城市。

3.4 水资源四元承载系统耦合协调度

3.4.1 时序变化 运用耦合协调发展模型, 计算得到 2010–2019 年关中地区水资源、经济、社会和生态环境子系统间的耦合协调度, 如图 7 所示。

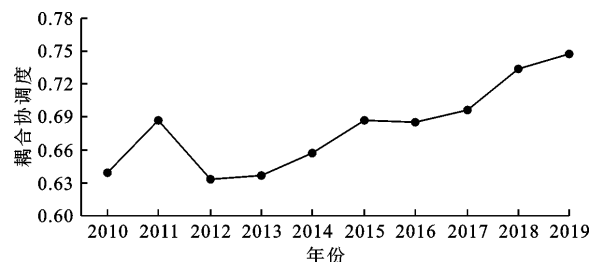


图 7 2010–2019 年关中地区水资源四元承载子系统耦合协调度

由图7可知,2010–2019年关中地区水资源四元承载子系统的耦合协调度数值逐年增大,均在(0.6, 0.8]区间内,表明耦合协调度整体呈波动上升趋势,均为中度协调状态,期间增幅为16.3%。这说明关中地区水资源、经济、社会和生态环境子系统间处于相互促进状态,能够取长补短,优势互补,使薄弱处逐渐补齐,逐步实现水资源的协调发展。从各子系统承载力变化(图4)来看,2010–2019年经济、社会及生态环境子系统承载力分别上升12.6%、4.5%和16.0%,虽然水资源子系统承载力下降了3.6%,但综合水资源承载力上升了7.2%。说明关中地区在促进经济社会发展的同时,推进了水资源的高效节约利用,减少了水环境污染,并注重生态环境保护,一定程度上弥补了水资源子系统资源供给压力增大的短板,使水资源–经济–社会–生态环境协调发展态势明显。其中2011年四元承载子系统的承载力普遍高于2010和2012年,且各子系统承载力与相邻年份的差值较小,使得该年耦合协调水平较高。

3.4.2 空间特征 运用耦合协调发展模型,分别计算2010–2019年关中地区各市水资源四元承载子系统的耦合协调度,并绘制变化趋势图,如图8所示。

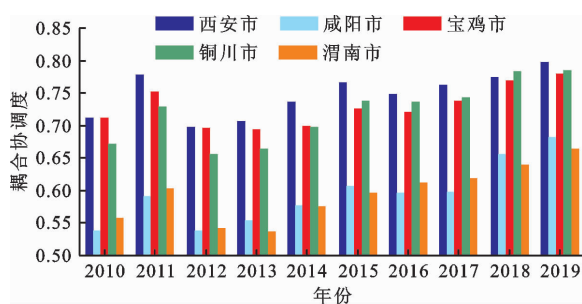


图8 2010–2019年关中地区各市水资源四元承载子系统耦合协调度变化趋势

由图8可知,2010–2019年关中5市水资源四元承载子系统的耦合协调度均有一定程度的提高,城市间差异逐渐减小。从各城市来看,西安市、铜川市和宝鸡市耦合协调度较高,研究时段内耦合协调度均介于(0.6, 0.8]内,表明四元承载子系统处于中度协调状态。西安市作为省会城市,经济社会发展势头良好,环境保护政策实施力度更强,发展协调程度始终保持领先水平。铜川市和宝鸡市各子系统的水资源承载力均处于一般或较强状态,使得各子系统表现出良性循环,耦合协调度较高。咸阳市和渭南市耦合协调度则相对较低,研究时段内平均水平为一般协调状态,但是2017年以后均提高到中度协调状态,说明这两个城市经济与资源环境的协调发展正在步入正轨。

4 讨论

4.1 水资源承载力时空分布特征

水资源承载能力直接反映了水资源系统的脆弱程度,水资源承载力强,面对外界非自然因素扰动时具有较强的恢复能力,则水资源系统脆弱性较低。刘珍等^[26]运用函数评价法对陕西省水资源脆弱性进行了评价,认为渭南市与咸阳市水资源脆弱性极强,且明显高于铜川市、宝鸡市及西安市,这与本文得出的渭南市和咸阳市相较于其余3市水资源承载能力明显较低的结论逻辑上具有一致性。夏玮静等^[5]通过计算承载压力指数对陕西省各流域水资源承载力进行了研究,结果表明2010和2016年铜川市、渭南市、咸阳市承载压力指数依次减小,且显著大于其余城市,与本文结果具有一致性。王在兴^[8]运用主成分分析法得出2010–2016年西安市水资源承载力呈波动下降趋势的结论,而本文结果为2010–2013年承载力逐年下降,2013–2016年逐年上升,这可能与研究尺度、评价指标选取、指标赋权及评价方法不同有关。

4.2 水资源承载力影响因素

本研究建立的关中地区水资源承载力评价指标体系中,权重较大的4个指标分别为水功能区水质达标率(0.076)、供水模数(0.055)、农田灌溉水有效利用系数(0.050)和城镇化率(0.049),说明该4个指标对关中地区水资源承载力影响显著。冯湘华等^[27]对咸阳市淳化县水资源承载力进行了评价,结果表明水资源利用率、供水模数、农田灌溉用水率为其水资源承载力的主要影响因素。布瑶^[28]在对宝鸡市陇县水资源承载力进行评价时,得出生态环境用水率、单位面积水资源量、耕地灌溉率及人口自然增长率对该地区水资源承载力影响较大的结论。由于研究尺度、指标选取、评价方法的不同,水资源承载力具体关键影响指标存在差异,但都是区域水资源自然条件、经济社会用水水平及生态环境保护程度的集中体现。

因此,为进一步提高关中地区水资源承载力,需首要考虑改善水资源条件,控制经济社会发展规模,并继续将生态环境保护作为城市建设的硬任务和大前提。(1)可通过推进引汉济渭等骨干水源工程建设、实施宝鸡峡等大中型灌区节水改造及加强蓄洪利用来提升区域水资源供给能力。(2)虽然在地区发展及新生育政策背景下,人口聚集及数量增长的趋势不可避免,但受当地水资源数量匮乏的限制,需要控制人口总数。(3)通过提高工业污水回用及处理能力,普遍推行生活节水并实施划定水功能区限制纳污红

线、加强与规范入河湖排污口监督管理等措施,从源头减少排放,从末端加强治理,以促进水资源承载力水平的提高。

4.3 水资源承载力与子系统间耦合协调度的关系

2010-2019 年,关中地区水资源承载力与子系统的耦合协调度变化趋势大体一致,经计算二者相关系数为 0.96,说明水资源承载力与各子系统间耦合协调度呈显著正相关。田培等^[29]研究结果表明长江中游城市群水资源承载力与承载子系统耦合协调度间相关系数为 0.98,呈较强正相关关系;而王保乾等^[22]研究发现长江经济带水资源承载力与子系统耦合协调度在 2007-2016 年变化趋势相反,二者呈负相关关系。这可能与研究区域及耦合协调度计算方法不同有关,本文认为,水资源承载子系统间耦合协调度体现了各子系统发展过程中的一致性与和谐程度,二者相关关系具有地区差异性。同时,本文在计算耦合协调度过程中,对表征各子系统重要程度的 4 个系数取值相等,但认为各子系统对区域水资源影响程度相同是否符合不同研究区的实际情况,以及如何客观合理地判断各子系统的重要性有待进一步研究。

5 结 论

本文在构建水资源承载力评价指标体系基础上,综合运用变化参数可变模糊识别模型、空间自相关分析和耦合协调度模型,从水资源承载力角度,对 2010-2019 年陕西省关中地区水资源、经济、社会及生态环境承载子系统的耦合协调程度时空演变特征进行了定量评价和综合分析,结论如下:

(1) 由于生态环境保护力度加大与产业结构合理性提高,2010-2019 年关中地区水资源承载力呈不规则“M”型波动上升,均处于Ⅲ级临界状态,水资源不是区域发展限制性因素。

(2) 从各子系统看,水资源子系统的承载力水平具有滞后性,且受降水量减少影响,承载力呈下降趋势;经济、社会及生态环境子系统的承载力水平差异化逐渐增大。

(3) 水资源承载力空间分布呈“南强北弱”特征,集中于临界或较弱 2 种承载状态,2010-2019 年空间差异性呈波动增大,且以 2018 年为拐点,差异性由不显著变为显著,其中咸阳市、渭南市的水资源承载力较低,分别是由水质污染严重、水资源利用效率不高所致。

(4) 2010-2019 年关中地区水资源、经济、社会及生态环境承载子系统的耦合协调程度亦呈波动上

升趋势,其间增幅为 16.3%,均为中度协调状态;各城市间差异逐渐减小,且西安市、铜川市和宝鸡市的耦合协调程度相对较高。

(5) 水资源承载力主要影响因素依次为水功能区水质达标率、供水模数、农田灌溉水有效利用系数和城镇化率。

参考文献:

- [1] 张 臻,曹春霞,何 波. 国土空间规划体系重构语境下“双评价”研究进展与趋势[J]. 规划师,2020,36(5):5-9.
- [2] 徐唐奇,胡慧娟,胡 丽. 陕西省千阳县草地资源承载力评价及其开发利用对策研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究),2019,4(12):47-51.
- [3] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报,2017,48(12):1399-1409.
- [4] 张 成,杨建康. 渭河流域陕西段水资源承载力分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):165-168.
- [5] 夏玮静,王宁练,沈 月. 基于流域的陕西省水资源承载力研究[J]. 干旱区地理,2020,43(3):602-611.
- [6] 刘晓君,刘 浪. 基于主成分分析的陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 数学的实践与认识,2020,50(1):55-62.
- [7] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):91-97.
- [8] 王在兴. 西安市水资源承载能力评价[D]. 西安:西安科技大学,2019.
- [9] 刘 燕,胡安焱. 渭河流域近 50 年降水特征变化及其对水资源的影响[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(1):85-87.
- [10] 胡德秀,李 立,张 艳,等. 渭河干流陕西段综合治理前后的水质变化与趋势[J]. 水土保持通报,2018,38(5):91-96.
- [11] 李 琪. 关中平原浅层地下水资源现状及管理保护对策[J]. 地下水,2012,34(5):62-63.
- [12] 惠洪河,蒋晓辉,黄 强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,21(1):30-34.
- [13] 张丽洁,康 艳,栗晓玲. 基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2019(1):76-83.
- [14] 刘一江,鲁春霞,黄绍琳. 京津冀西北农牧交错区水资源承载力综合评价:以张家口为例[J]. 草业科学,2020,37(7):1302-1312.
- [15] 董兴辉,张鑫森,郑 凯,等. 基于组合赋权和云模型的风电机组健康状态评估[J]. 太阳能学报,2018,39(8):2139-2146.
- [16] 邓 雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [17] 张先起,梁 川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报,2005,36(9):1057-1061.

(下转第 83 页)

- [J]. Water, 2020, 12(12): 3564.
- [22] 李俊晓,李朝奎,罗淑华,等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 210-214+286.
- [23] 广东省统计局,国家统计局广东调查总队. 2008-2021 年广东省统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008-2021.
- [24] 广东省水利厅. 2007-2020 年广东省水资源公报[R]. 广州:广东省水利厅, 2007-2020.
- [25] 郭倩,汪嘉杨,张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 484-493.
- [26] 苏屹,于跃奇. 基于加速遗传算法投影寻踪模型的企业可持续发展能力评价研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 130-139.
- [27] 李晓英,江崇秀,张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 215-221.
- [28] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1441-1452.
- [29] 刘莉,汪丽娜. 基于熵权-正态云模型的水资源可持续性评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(1): 77-84.
- [30] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 847-856.
- [31] 冯欣,姜文来,刘洋,等. 水资源价值模糊数学模型研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1834-1848.
- [32] 中华人民共和国水利部办公厅. 全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)[S]. 水利部水利水电规划设计总院, 2016.
- [33] 徐志青,刘雪瑜,肖书虎,等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 44-52.
- [34] 范嘉伟,黄锦林,袁明道,等. 基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 100-105.
- ~~~~~
- (上接第 74 页)
- [18] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271+277.
- [19] 孟丽红,叶志平,董书庆,等. 可变模糊集理论在江西省水资源承载力评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(10): 8-16.
- [20] 沈威,鲁丰先,秦耀辰,等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [21] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 24-29.
- [22] 王保乾,杨晖,竺运. 长江经济带水资源承载力综合评价研究[J]. 资源与产业, 2020, 22(1): 1-11.
- [23] 阳斌成,张家其,罗伟聪,等. 基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009-2018 年水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 357-364.
- [24] 赵勇宏. 铜川市水资源保护利用分析及对策研究[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(2): 66-69.
- [25] 唐继张,夏伟,周维博,等. 基于关键绩效指标的西安市水循环健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 39-45+60.
- [26] 刘珍,文彦君,韩梅,等. 人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 82-86.
- [27] 冯湘华,宋孝玉,晁智龙. 淳化县水资源承载力预测评价[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 447-453.
- [28] 布瑶. 基于模糊综合评价和主成分分析的水资源承载力评价研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019.
- [29] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871-1884.