

赵立杰, 仕玉治, 李福林, 等. 基于云耦合协调模型的水资源关联系统协调性动态评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 747-758. ZHAO L J, SHI Y Z, LI F L, et al. Dynamic evaluation of water resources correlation system coordination based on cloud coupling coordination model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 747-758. (in Chinese)

## 基于云耦合协调模型的 水资源关联系统协调性动态评价

赵立杰<sup>1,4</sup>, 仕玉治<sup>1,2</sup>, 李福林<sup>1,2</sup>, 黄继文<sup>1,2</sup>, 钱秀红<sup>3</sup>, 黎明扬<sup>1,2</sup>, 王锐<sup>1,2</sup>

(1. 山东省水利科学研究院, 济南 250013; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 济南 250013;  
3. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 济南 250100; 4. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022)

**摘要:**以山东省为研究区域, 选取 21 个代表性指标, 采用熵权-层次分析法确定水资源关联系统协调性评价指标权重, 构建云耦合协调模型, 分析 2010—2021 年水资源关联系统协调性及动态变化。结果表明: 山东省水资源关联系统耦合协调度整体呈现不断上升的变化趋势, 其变化范围为 0.608~0.715, 耦合协调发展等级逐渐由初级协调水平向中级协调水平发展变化, 在 2014 年和 2019 年出现明显变点; 在空间上各地区耦合协调度呈现东高西低的分布特征, 不同阶段耦合协调发展水平地域性差异性较为明显, 整体上由高到低为胶东半岛地区>鲁中南地区>鲁西北地区, 其中, 济南市和青岛市耦合协调发展能力最优, 达到良好协调水平, 德州市和滨州市耦合协调发展能力较为缓慢, 维持在初级协调水平; 未来山东省应加强鲁西北平原区水资源关联系统协调发展, 促进全省空间均衡。

**关键词:**云耦合协调模型; 水资源关联系统; 协调度; 动态评价; 山东省

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0076

水资源是保障经济社会发展、维护生态健康的基础性、战略性要素<sup>[1]</sup>, 且与经济社会系统和生态环境系统密切关联。随着经济社会发展对水资源需求持续增大, 如何实现水资源关联系统协调性发展备受关注<sup>[2]</sup>。由此, 科学评价区域水资源关联系统协调程度, 对提升区域水资源关联系统安全水平尤为重要, 也对推动区域生态保护和经济高质量发展具有重要意义。

近年来, 许多学者对水资源关联系统协调评价进行研究, 主要围绕“水-经济社会”<sup>[3-5]</sup>、“水-能源-粮食”<sup>[6-8]</sup>、“水-植被-土壤”<sup>[9]</sup>、“水-经济-生态”<sup>[10-12]</sup>等领域展开。如: 左其亭等<sup>[3]</sup>结合障碍因子分析了水资源利用效率与经济社会的协调发展关系; 张礼兵等<sup>[6]</sup>研究发现在灌区实行供需双侧优化调控能提高“水-能源-粮食”系统耦合协调性和适配性。研究尺度

上主要涉及流域尺度和区域尺度, 如: 蔡振华等<sup>[13]</sup>在马颊河流域探讨了长时间序列下水资源和城市化的耦合变化过程; 吴青松等<sup>[1]</sup>量化分析了塔里木河流域“水-经济-生态”的和谐程度; 喻笑勇等<sup>[4]</sup>对湖北省各地市的“水-经济社会”发展作相关性研究。评价方法上主要采用定性评价, 概括起来有灰色关联度<sup>[14]</sup>、压力-状态-响应模型<sup>[15]</sup>、耦合协调模型<sup>[16-17]</sup>、距离协调度<sup>[18]</sup>等。灰色关联度实质是利用参考数列与比较数列曲线形状的相似程度来判断系统中多因素间的接近程度; 压力-状态-响应模型是基于指标的因果关系来进行探讨; 耦合协调模型能对关联系统间耦合协调关系进行综合分析评价, 在“水资源-城市化”“区域经济发展”等领域应用最为广泛, 并取得了较好的应用效果。定性评价方法在构建评价指标体系以及量化评价标准等过程具有一

收稿日期: 2024-02-03 修回日期: 2024-04-22 网络出版时间: 2024-07-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240714.2307.002>

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010905); 山东省水利科学研究院院士科研计划项目(SDSKYZX202121-3); 山东省流域水利管理服务中心重点水利工程研究与试验项目(XQHFHZZL-KY202004)

作者简介: 赵立杰(1998—), 男, 山东潍坊人, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: zhaolijie1998@163.com

通信作者: 仕玉治(1980—), 男, 山东日照人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源管理与规划、地下水生态水文模拟研究。E-mail: syz101066@163.com

定模糊性,而目前耦合协调模型在评价指标和耦合协调度分级标准等过程尚未考虑这种不确定性,由我国李德毅提出的不确定性云理论<sup>[19]</sup>,能充分刻画定性定量指标不确定性,可实现定性定量过程的相互转换,该方法已在水质评价<sup>[20]</sup>、灾害风险分析<sup>[21]</sup>、水生态评价<sup>[22]</sup>及水资源承载力<sup>[23]</sup>等领域广泛应用,但在水资源关联系统耦合协调性评价中应用较少。

本研究引入云理论构建云耦合协调模型分析评价水资源关联系统协调性,使得评价结果更具泛化性,以山东省为研究对象,遴选 21 个代表性指标,采用熵权-层次分析法确定评价指标组合权重,构建云耦合协调模型分析评价山东省 2010—2021 年的水资源关联系统的协调性及动态变化特征。研究成果可为山东省水资源关联系统协调发展提供技术支撑。

## 1 研究区概况

山东省地处我国东部沿海,北接京津冀,南连长三角,西引黄河流域,东与日韩隔海相望,是我国重要的工业基地和北方地区经济发展的战略支点,是促进南北均衡发展、东西陆海统筹,联通东北亚和“一带一路”的重要枢纽,在我国加快构建新发展格局、全面建设社会主义现代化国家新征程中具有重要地位。山东省分属黄、淮、海三大流域,陆域面积 15.58 万 km<sup>2</sup>,占全国总面积的 1.67%,现辖 16 个地级市,按照地形地貌特点,划分为鲁西北平原区(德州、东营、聊城和滨州)、鲁中南山丘区(济南、淄博、潍坊、泰安、济宁、临沂、枣庄、菏泽和日照)和胶东半岛地区(青岛、烟台和威海);属暖温带季风气候,多年平均降雨量 666.5 mm,多年平均水资源总量 303.07 亿 m<sup>3</sup>,人均水资源量 298 m<sup>3</sup>,地区分布不均且年际内变化剧烈。2021 年,全省常住人口 10 170 万人,城镇化率 63%,地区生产总值 83 095.90 亿元,位居全国第 3 位。山东省以全国 1.09% 的水资源量承载着全国 7.20% 的人口和 7.27% 的经济总量,实现区域水资源关联系统协调发展尤为重要。

## 2 研究方法

### 2.1 构建水资源关联系统评价指标体系

区域水资源关联系统的相互影响因素众多,遵循科学性、代表性、独立性等原则,参考相关文献<sup>[1,11]</sup>建立水资源关联系统协调性评价指标体系,并将其

划分成目标层、准则层与指标层。目标层为水资源关联系统的耦合协调度。准则层由 3 个系统构成:水资源子系统描述了区域的水资源禀赋条件、用水效益、水土匹配情况与用水结构,是核心的主体;经济社会子系统描述了与水资源相关的城市经济社会发展水平、产业结构与经济社会效益;生态环境子系统反映了区域生态环境状况。指标层由准则层下遴选的 21 个代表性指标组成,并采用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)法<sup>[24]</sup>对指标进行独立性检验,最终确定水资源关联系统评价指标体系,其相关指标含义及数据来源见表 1。

### 2.2 熵权-层次分析法确定组合权重

考虑主观赋权的主观认识偏差与客观赋权数据信息不足问题,采用熵权-层次分析法组合权重法对评价指标赋权。

客观权重  $w_1$  采用熵权法<sup>[25]</sup>计算,具体步骤如下。

(1)将指标数据标准化处理得到  $r_{ij}$ 。 $i$  为地区数量,  $i=1,2,\dots,n$ ;  $j$  为指标个数,  $j=1,2,\dots,m$ 。

(2)计算熵值。计算公式为

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left[ \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right] \quad (1)$$

式中:  $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij}$ , 当  $f_{ij}$  为 0 时, 令  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

(3)计算指标权重。计算公式为

$$w_1 = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (2)$$

主观权重  $w_2$  采用层次分析法计算,具体由专家对水资源关联系统同层次指标进行重要性比较,得到相对重要程度数值的判断矩阵,用归一化计算相对权重并求解特征向量和最大特征值,同时进行一致性检验,最后确定评价指标主观权重,具体计算过程不再赘述,详见参考文献<sup>[26]</sup>。

计算组合权重  $w_i$ , 公式为

$$w_i = (1 - \alpha)w_1 + \alpha w_2 \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  取值为 0.5<sup>[27]</sup>。

水资源关联系统的评价指标权重见表 2。

### 2.3 云耦合协调模型评价方法

云模型采用期望  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_c$  3 个特征参数表征概念<sup>[28]</sup>, 本文采用普适正态云<sup>[19]</sup>与耦合协调模型构建评价模型。首先,计算评价指标和耦合协调度评价等级的云特征参数,确定评价指标正态云

以及耦合协调度评价等级基准云;其次,利用评价方案的指标属性值及其正态云特征参数随机计算云隶属度,运用耦合协调度模型获得各子系统综合评价指数及关联系统耦合协调度,利用正态逆向云发生器<sup>[29]</sup>获得耦合协调度评价云;最后,计算分析

耦合协调度评价云与其评价等级基准云的云相似度,依据云相似度原则确定评价方案协调性等级,同时采用耦合协调度、综合评价指数的云期望参数定量分析山东省水资源关联系统长序列时空动态变化特征。

表1 水资源关联系统评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water resources linkage system

目标层	准则层	指标层	序号	类型	指标含义及计算	数据来源			
水资源 子系统		水资源开发利用率/%	C <sub>1</sub>	-	水资源被开发量/水资源总量	《水资源公报》数据计算获取			
		人均水资源量/m <sup>3</sup>	C <sub>2</sub>	+	水资源总量/人口总数				
		产水模数/(万m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	C <sub>3</sub>	+	水资源总量/面积				
		地下水供水占比/%	C <sub>4</sub>	-	地下水供水量/总供水量				
		蓄水工程蓄水率/%	C <sub>5</sub>	+	大中型水库年末蓄水量/水库蓄水量				
		灌溉水有效利用系数	C <sub>6</sub>	+	渠系利用系数×田间水利用系数		《水资源公报》及地市水文资料计算获取		
		跨流域调水量占比/%	C <sub>7</sub>	-	实际外调水量/实际用水总量				
		水资源用控比	C <sub>8</sub>	-	实际用水总量/用水总量目标				
水资源 关联 系统 耦合 协调度	经济社会 子系统	人均GDP/元	C <sub>9</sub>	+	GDP/总人口	《统计年鉴》数据计算获取			
		人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	C <sub>10</sub>	-	人口总数/面积				
		城镇化率/%	C <sub>11</sub>	+	社会发展水平				
		万元GDP用水量/m <sup>3</sup>	C <sub>12</sub>	-	用水量				
		万元工业增加值用水量/m <sup>3</sup>	C <sub>13</sub>	-	用水量(工业增加值)				
		第一产业生产总值占比/%	C <sub>14</sub>	+	第一产业产值占GDP的比例		《水资源公报》、《统计年鉴》、地市统计资料计算获取		
		人均生活用水量/m <sup>3</sup>	C <sub>15</sub>	+	居民生活用水和公共建筑用水/总人口				
		城镇公共供水管网漏损率/%	C <sub>16</sub>	-	管网漏损水量/管网总水量				
		生态环境 子系统		建成区绿化覆盖率/%	C <sub>17</sub>		+	建成区绿化覆盖面积/建成区面积	《统计年鉴》、《水资源公报》获取
				湿地面积占比/%	C <sub>18</sub>		+	区域湿地总面积/区域总面积	
				生态环境用水率/%	C <sub>19</sub>		+	生态环境用水量/总用水量	
				城市污水处理率/%	C <sub>20</sub>		+	城市内污水处理量/污水排放总量	
水功能区水质达标率/%	C <sub>21</sub>			+	水质达标的水功能区数量/全部监测水功能区数量				

表2 水资源关联系统评价指标权重

Tab. 2 Evaluation index weight of water resources correlation system

指标序号	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>i</sub>	指标序号	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>i</sub>	指标序号	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>i</sub>
C <sub>1</sub>	0.128	0.120	0.124	C <sub>8</sub>	0.090	0.150	0.120	C <sub>15</sub>	0.149	0.121	0.135
C <sub>2</sub>	0.142	0.128	0.135	C <sub>9</sub>	0.132	0.118	0.125	C <sub>16</sub>	0.180	0.100	0.140
C <sub>3</sub>	0.118	0.138	0.128	C <sub>10</sub>	0.160	0.076	0.118	C <sub>17</sub>	0.244	0.180	0.212
C <sub>4</sub>	0.138	0.112	0.125	C <sub>11</sub>	0.123	0.057	0.090	C <sub>18</sub>	0.224	0.168	0.196
C <sub>5</sub>	0.177	0.071	0.124	C <sub>12</sub>	0.149	0.141	0.145	C <sub>19</sub>	0.191	0.153	0.172
C <sub>6</sub>	0.142	0.096	0.119	C <sub>13</sub>	0.132	0.112	0.122	C <sub>20</sub>	0.211	0.183	0.197
C <sub>7</sub>	0.129	0.121	0.125	C <sub>14</sub>	0.148	0.102	0.125	C <sub>21</sub>	0.232	0.214	0.223

### 2.3.1 确定评价指标的云特征参数

(1) 求期望 $E_x$ 。对任意评价指标,利用2010—2021年指标值从小到大排序,记为 $X_i$ ,评价

区间 $[a, b]$ 取值为 $[X_{\min}, X_{\max}]$ ;若指标为正向指标,则期望 $E_x$ 等于 $X_{\max}$ ;若指标为负向指标,则期望 $E_x$ 等于 $X_{\min}$ 。

(2)求 $E_n$ 。参考文献 [30], 假定评价区间中点值对应云隶属度为 0.5, 即

$$\exp\left[-\frac{(a-b)^2}{8E_n^2}\right] = 0.5 \quad (4)$$

则 $E_n$ 计算公式为

$$E_n = \frac{|a-b|}{2.335} \quad (5)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 为评价区间的上下限。

(3)求 $H_e$ 。

$$H_e = k \quad (6)$$

当超熵值趋于零时, 云模型简单概化为单一正态分布, 超熵较大时, 云模型离散较大。一般情况下,  $k=0.1\sim 0.5$ , 当 $E_n$ 较大时, 可采用 $H_e = 0.1E_n$ 。以城镇化率和万元工业增加值用水量评价指标为例, 采用正向云发生器<sup>[29]</sup>生成评价指标隶属度云图, 见图 1。

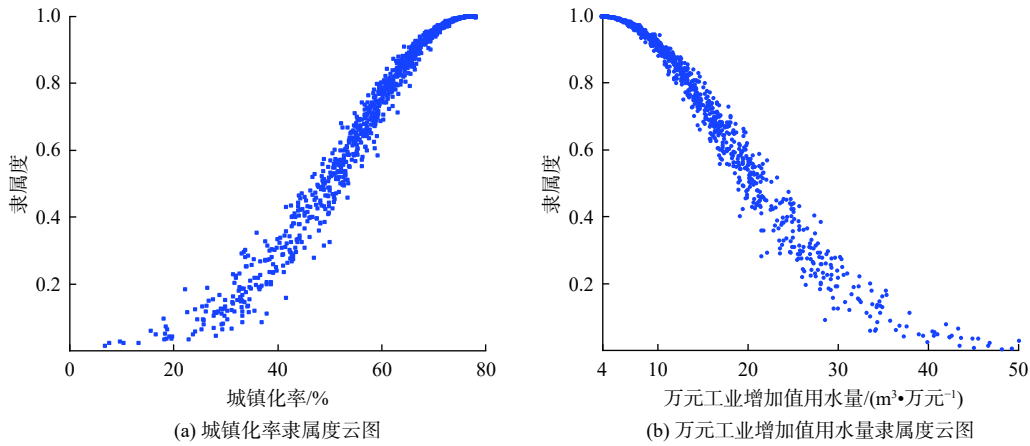


图 1 城镇化率(a)和万元工业增加值用水量(b)隶属度云图

Fig. 1 Cloud image of urbanization rate (a) and ten thousand yuan of industrial added value of water consumption (b) membership degree

### 2.3.2 确定评价等级的云特征参数

借鉴已有研究成果<sup>[11,31]</sup>, 对耦合协调度 $D$ 设置不

同等级标准, 结合实际情况对耦合协调度等级进行划分, 见表 3。

表 3 耦合协调度 $D$ 判别标准

Tab. 3 The division standard of coupling coordination degree  $D$

等级	[0,0.1)	[0.1,0.2)	[0.2,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1)
$D$	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调

对任意耦合协调度的级别采用公式(4)~(6)确定云特征参数。其中, 耦合协调度的最小最大级别云期望值采用 0 和 1, 其他等级取其标准区间中点值。耦合协调度评价等级基准云图见图 2。

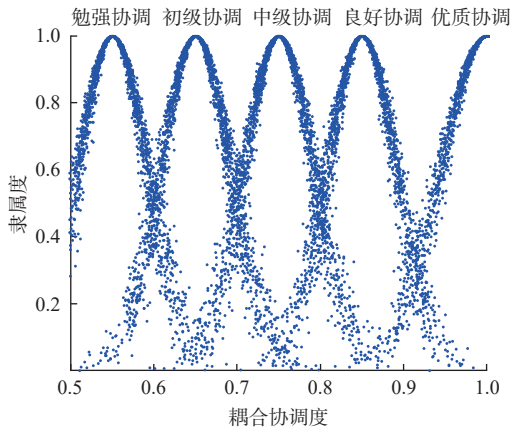


图 2 耦合协调度评价等级基准云图

Fig. 2 The coupling coordination degree evaluation grade benchmark cloud map

### 2.3.3 计算耦合协调度云

已知评价指标 $X(x = x_i)$ 和正态云参数 $(E_{x,i}, E_{n,i}, H_{e,i})$ , 计算耦合协调度云的步骤如下。

步骤 1: 计算评价指标云隶属度。

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_{x,i})^2}{2E_{n,i}^2}\right] \quad (7)$$

式中:  $E'_{n,i}$ 为 正 态 随 机 数,  $E'_{n,i} = \text{randn}(1)H_e + E_{n,i}$ ;  $\text{randn}(1)$ 为 随 机 数;  $\mu(x_i)$ 为 云 隶 属 度;  $x_i$ 为 指 标 值。

步骤 2: 计算子系统综合评价指数。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \mu(x_i) w_{f,i}$$

$$g(y) = \sum_{i=1}^n \mu(x_i) w_{g,i}$$

$$h(z) = \sum_{i=1}^p \mu(x_i) w_{h,i} \quad (8)$$

式中:  $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 分别为水资源子系统、经济

社会子系统和生态环境子系统的综合评价指数;  $w_{g,i}$ 、 $w_{g,i}$ 、 $w_{h,i}$  为 3 个子系统中评价指标的权重;  $m$ 、 $n$ 、 $p$  为 3 个子系统的评价指标个数。

步骤 3: 计算耦合协调度。

$$C = \sqrt[3]{\frac{f(x)g(y)h(z)}{[f(x)+g(y)+h(z)]/3}} \quad (9)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (10)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (11)$$

式中:  $C$  为耦合度;  $D$  为耦合协调度;  $T$  为水资源关联系统的评价值;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为待定系数, 反映了系统的重要程度。综合文献 [31-32] 和实际情况, 确定待定系数:  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.3$ ,  $\gamma = 0.3$ 。

步骤 4: 重复步骤 1~3 取得 2 000 组耦合协调度云滴, 采用逆向云发生器生成耦合协调度评价结果云。

$$E_{xD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (12)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - E_{xD})^2 \quad (13)$$

$$E_{nD} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n |D_i - E_{xD}| \quad (14)$$

$$H_{eD} = \sqrt{s^2 - E_{nD}^2} \quad (15)$$

式中:  $D_i$  为耦合协调度云滴值;  $E_{xD}$  为云滴均值;  $s^2$  为云滴方差;  $E_{nD}$  为熵;  $H_{eD}$  为超熵;  $n=2\ 000$ 。

步骤 5: 采用云相似度准则 [28]。设云向量  $\vec{V}_i = V_i(E_{xD}, E_{nD}, H_{eD})$ ,  $\vec{V}_j = V_j(E_{xD}, E_{nD}, H_{eD})$ , 则  $\vec{V}_i$  与  $\vec{V}_j$  的余弦称为云相似度  $CS(i, j)$ , 即

$$CS(i, j) = \cos(\vec{V}_i, \vec{V}_j) = \frac{\vec{V}_i \cdot \vec{V}_j}{|\vec{V}_i| |\vec{V}_j|} \quad (16)$$

式中:  $\vec{V}_i$  为水资源关联系统的“耦合协调度云向量”;  $\vec{V}_j$  为“基准云向量”; 云相似度高值所对应的基准云

评价等级即为水资源关联系统耦合协调度的评价等级。

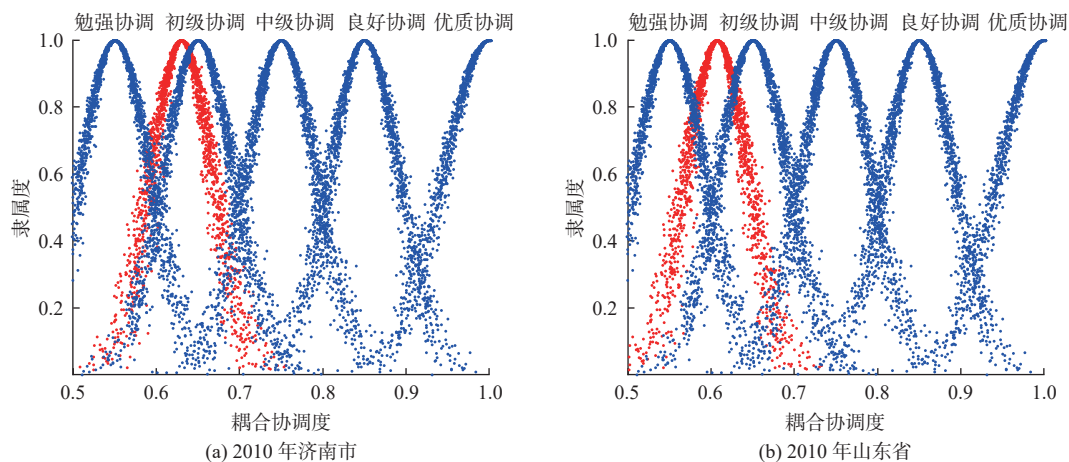
### 3 结果与分析

#### 3.1 耦合协调度云评价结果表征

限于篇幅, 仅以济南市和山东省 2010 年、2016 年和 2021 年评价方案为例, 采用云耦合协调模型得到济南市和山东省的耦合协调度评价云, 见图 3。经计算济南市 2010 年、2016 年和 2021 年评价方案的耦合协调等级分别为初级协调、中级协调和良好协调, 山东省耦合协调等级为初级协调、初级协调和中级协调。利用协调度评价云更加直观展现评价方案等级评定结果, 同理可计算获得其他地市 2010—2021 年长序列的耦合协调度云, 各地市水资源关联系统耦合协调度评价结果见表 4。

#### 3.2 耦合协调度时空特征分析

图 4 反映了 2010—2021 年山东省水资源关联系统耦合协调度和各子系统综合评价指数变化过程。2010—2021 年山东省水资源关联系统耦合协调度整体呈现上升趋势, 在 2014 年和 2019 年经历两次下降, 随后回归上升变化趋势, 耦合协调度变化区间为 0.608~0.715, 协调评价等级由初级协调水平向中级协调水平发展变化。水资源关联系统耦合协调度与其子系统综合评价指数变化趋势具有较强的同步性, 但也有局部时段差异性。水资源子系统的综合评价指数呈现先下降后波动增长变化趋势, 在 2021 年出现最高值 0.520, 2014 年到达最低值 0.352; 经济社会子系统和生态环境子系统的综合评价指数均呈现稳定增长趋势, 经济社会子系统的发展水平高于生态环境子系统的发展水平; 自 2014 年以后, 生态环境子系统的发展水平与水资源子系统的发展水平交互同步提升。



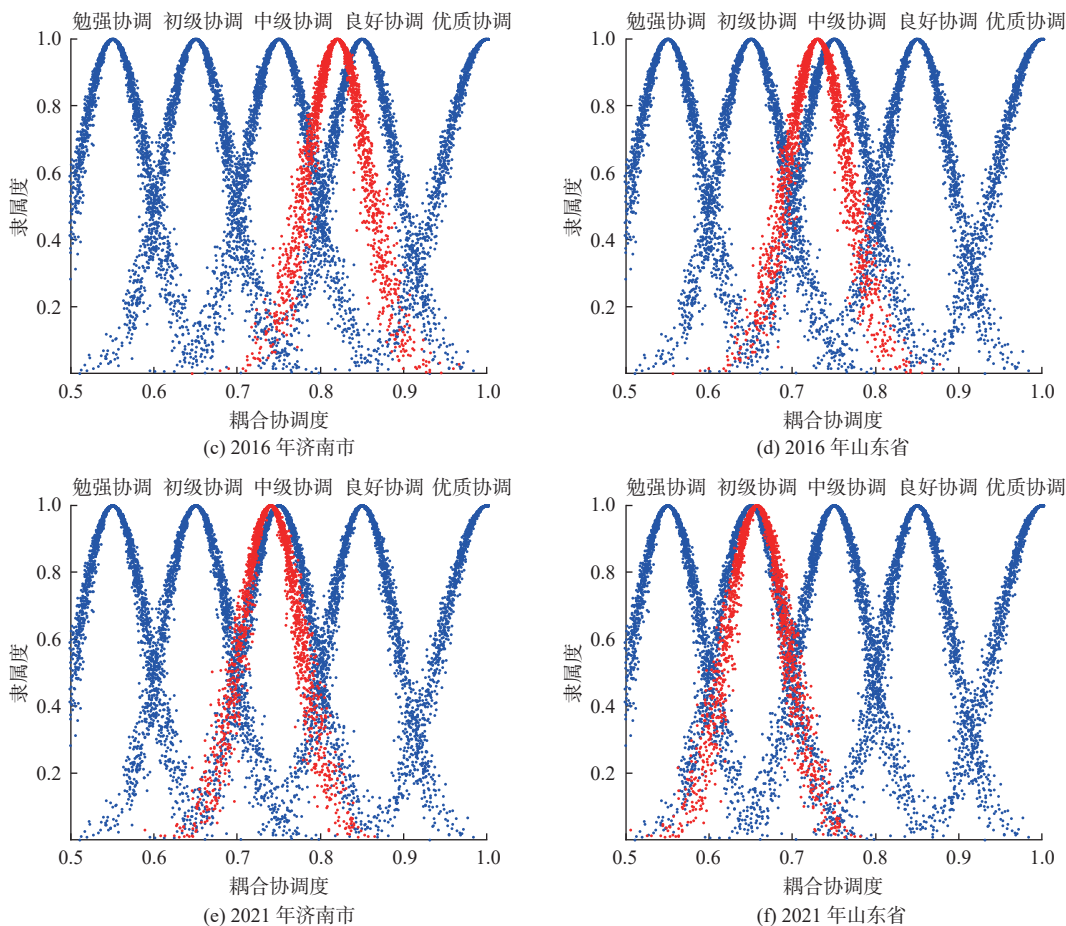


图 3 2010 年、2016 年、2021 年济南市和山东省耦合协调度评价等级云图

Fig. 3 The change cloud map of coupling coordination degree between Jinan and Shandong in 2010, 2016 and 2021

2010—2014 年水资源子系统发展水平不断下降,以最低点 2014 年为例,山东多地遭遇严重干旱,人均水资源量很低,只有 154.75 m<sup>3</sup>,较 2013 年减少 52.25%,且远低于全国人均水资源量;全省产水模数为 9.52 万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,比多年平均值 18.04 万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> 下降 47.24%;地下水开采量是地表水资源量的 1.46 倍,期间山东省内最大的峡山水库水量也罕见地达到死库容水位,引长江黄河水的指标不断上升,使得水资源子系统发展水平偏低,耦合协调度下降。水资源子系统空间差异性较为明显,如东营受影响最大,为 0.568,较上一年下降 16%,当年的水资源总量只有 1.37 亿 m<sup>3</sup>,不足该地多年平均值的 1/5,淄博、潍坊等地也有所下降,降幅为 3%~8%,而济南、威海等地耦合协调度几乎不受影响(图 5),这与济南地下水丰富、威海人均水资源量较高等因素密切相关,水资源子系统调节能力脆弱。2019 年以后,山东省水资源总量高达 300 多亿 m<sup>3</sup>,且伴随着国家及区域水资源配置工程水网加快推进,工程蓄水保障能力的提升有效减弱了水资源关联系统发展不平

衡不协调问题,使得水资源子系统综合评价指数在 2020 年和 2021 年上升到 0.464 和 0.517,年际变化趋于平稳。虽在 2019 年下降为 0.413,但降幅只有 2014 年的 39%,耦合协调度也仅下降 1.2%,可见水资源子系统的调节能力明显增强,水资源丰枯变化对整体耦合协调性也具有一定影响。

由图 5 可知,济南、青岛、威海、淄博、烟台和枣庄等地级市的耦合协调度整体上呈现增长变化趋势,其协调发展水平始终高于全省平均水平,相差变幅 0.06~0.11。济南和青岛等经济强市的耦合协调度处于全省领跑水平,在 2021 年更是达到中级协调发展水平,分别为 2010 年的 1.21 和 1.27 倍,究其原因还是用水效率很高。如,济南和青岛市的万元工业增加值用水量分别达到 10.30 m<sup>3</sup> 和 5.58 m<sup>3</sup>,且城镇化水平、生态用水率和人均生活用水量等指标远高于全省平均水平。聊城、滨州、东营、德州和菏泽等地级市耦合协调度呈现波动上升变化趋势,其协调发展水平低于全省平均水平,只有德州和菏泽的耦合协调度在 2010 年分别为 0.464 和 0.492,

处于濒临失调水平,到2021年才逐步上升到初级协调发展水平;滨州水资源关联系统协调发展水平提升最缓慢,2010—2021年仅提升0.066,主要是因为该地的水资源开发利用率高、用水效率低和用水量较大,如水资源开发利用率高居全省第二位,万元GDP用水量虽由2010年的98.61 m<sup>3</sup>过渡到2021年的52.71 m<sup>3</sup>,但相较于青岛和威海等地小于10 m<sup>3</sup>依然有较大差距,且用水总量多年平均值为15.90 亿 m<sup>3</sup>,

高出全省平均值2.96 亿 m<sup>3</sup>。济宁、临沂、泰安和日照等地级市的耦合协调度呈现增长变化趋势,其协调发展水平略低于全省平均水平。各地市耦合协调度整体上在2014年和2019年均出现下降,这与山东省整体发展水平变化一致,究其原因受到水资源子系统波动性变化影响有较强关系,这也正体现在水资源关联系统中水资源的刚性约束作用。

表4 山东省水资源关联系统耦合协调度评价结果

Tab. 4 Evaluation results of coupling coordination degree of water resources correlation system in Shandong Province

地区	2010年		2016年		2021年	
	耦合协调度D	等级	耦合协调度D	等级	耦合协调度D	等级
济南	0.631	初级协调	0.738	中级协调	0.805	良好协调
青岛	0.665	初级协调	0.724	中级协调	0.808	良好协调
淄博	0.697	初级协调	0.740	中级协调	0.797	中级协调
枣庄	0.630	初级协调	0.698	初级协调	0.749	中级协调
东营	0.609	初级协调	0.638	初级协调	0.716	中级协调
烟台	0.636	初级协调	0.612	初级协调	0.707	中级协调
潍坊	0.590	勉强协调	0.584	勉强协调	0.709	中级协调
济宁	0.586	勉强协调	0.633	初级协调	0.688	初级协调
泰安	0.596	勉强协调	0.635	初级协调	0.675	初级协调
威海	0.670	初级协调	0.684	初级协调	0.761	中级协调
日照	0.598	勉强协调	0.631	初级协调	0.717	中级协调
莱芜	0.658	初级协调	0.744	中级协调	-	/
临沂	0.601	初级协调	0.625	初级协调	0.670	初级协调
德州	0.464	濒临失调	0.611	初级协调	0.657	初级协调
聊城	0.576	初级协调	0.608	初级协调	0.684	初级协调
滨州	0.572	初级协调	0.635	初级协调	0.638	初级协调
菏泽	0.492	濒临失调	0.586	勉强协调	0.656	初级协调
山东	0.608	初级协调	0.655	初级协调	0.715	中级协调

注:2019年后莱芜市行政区划归济南市,不再作为独立行政区参与评价。

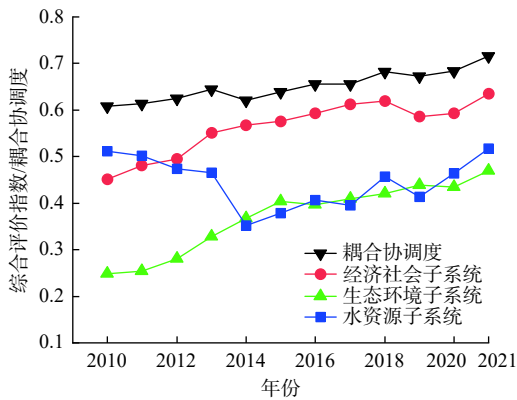


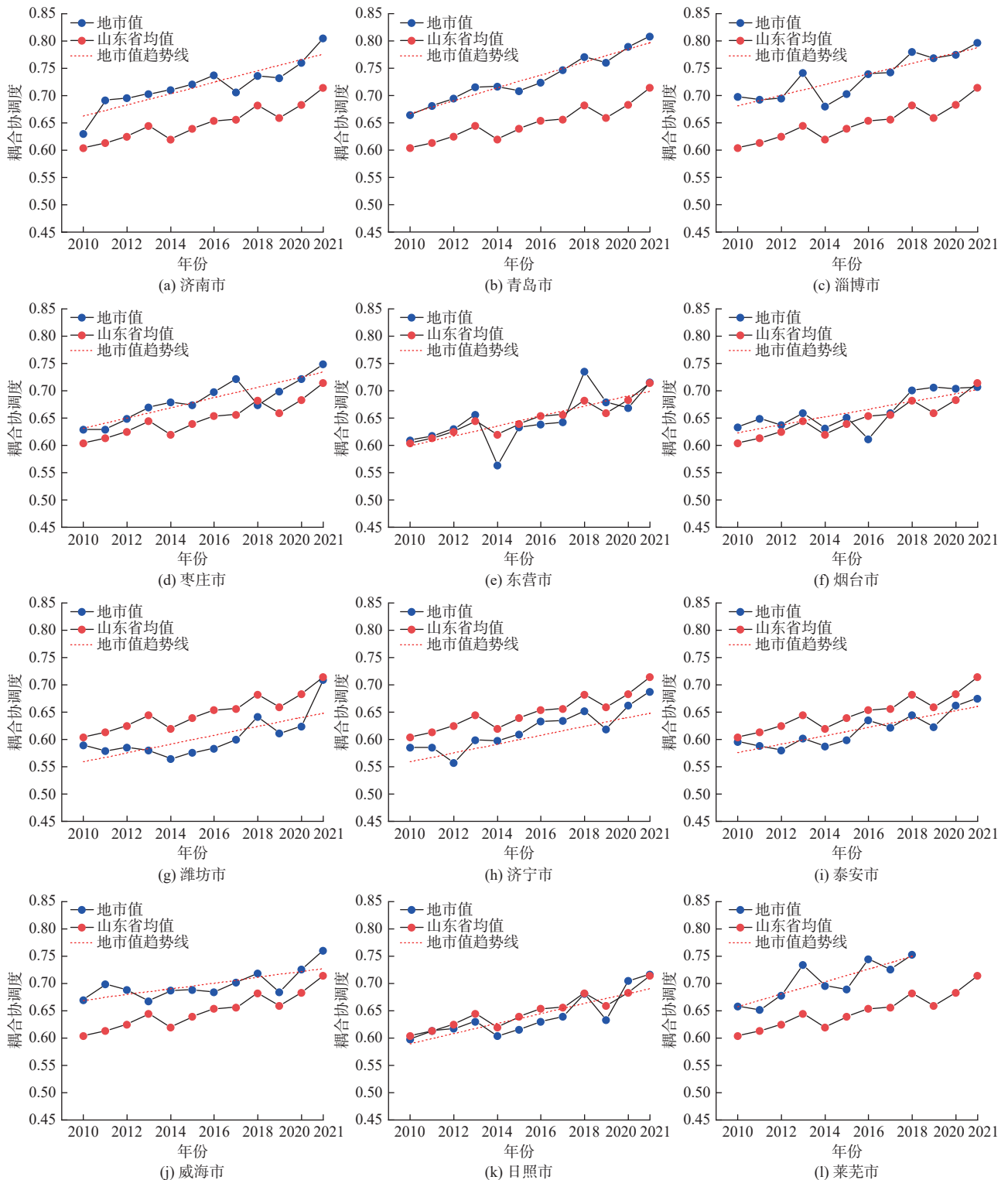
图4 水资源关联系统耦合协调度及其子系统综合评价指数变化

Fig. 4 The change process of coupling coordination degree of water resources correlation system and its subsystem comprehensive evaluation index

图6 展现了山东省各地市不同阶段水资源关联系统耦合协调度空间分布变化情况。山东省各地市耦合协调度整体上呈现东高西低的空间分布。2010年,胶东半岛地区(0.656)优于鲁中南山丘区(0.608)和鲁西北平原区(0.555),各地市耦合协调发展水平空间差异性最为明显,呈现螺旋状分布。2016年,山东省各地市整体上有较大提升,提升幅度0.015~0.147,其中鲁西北平原区提升幅度最大,是2010年的1.12倍,不同地区之间差异性逐步缩减,其中,济南市和淄博市的水资源关联系统耦合协调性跃升全省前两位,菏泽市耦合协调度最低。2021年,山东省各地市水资源关联系统耦合协调度

整体上空间差异更加趋于均化,达到 2010 年以来最高发展水平,胶东半岛地区为中级协调(0.759),鲁中南山丘区为中级协调(0.718),鲁西北平原区初级协调(0.674)。青岛、烟台和威海等胶东半岛地区耦合协调度水平最高;其次为济南、淄博、潍坊、泰安和济宁等鲁中南山丘区,其城市之间耦合协调发展水平差异性较大,青岛和济南协调发展水平最高,

济宁和临沂协调发展水平较低,德州、聊城和滨州等鲁西北平原区耦合协调度最低,但也由濒临协调水平发展到 2021 年的初级协调水平,这与黄河流域生态保护与高质量发展纳入国家战略,山东省沿黄河地市的经济社会发展和生态治理修复以及水资源节约集约利用管理提升有着密切联系,使鲁西北地区城市协调发展水平有了一定提升。





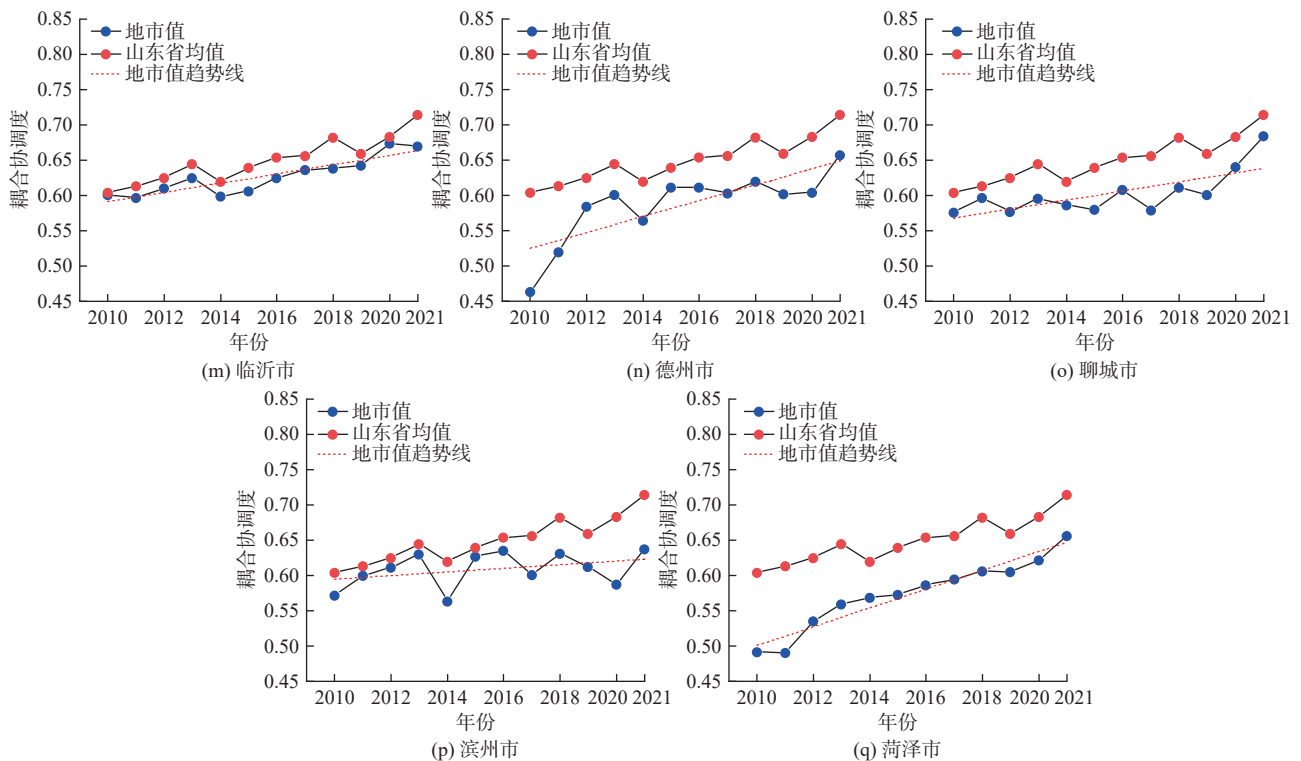


图 5 2010—2021 年山东及各地市水资源关联系统耦合协调度变化

Fig. 5 The change process of coupling coordination degree of water resources correlation system in Shandong Province and prefecture-level cities from 2010 to 2021

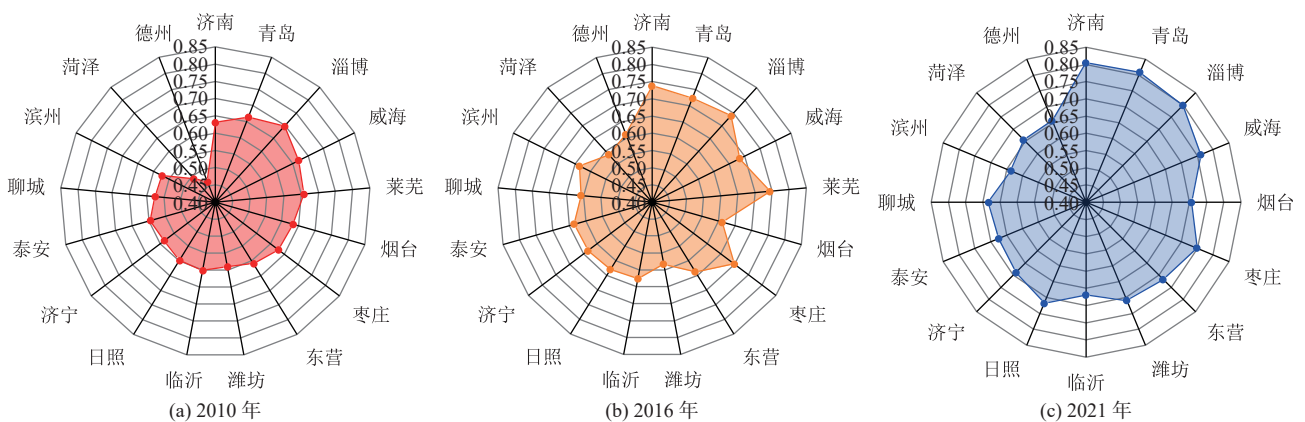


图 6 山东省各地市水资源关联系统耦合协调度阶段性空间分布

Fig. 6 The spatial distribution change map of coupling coordination degree stage of water resources correlation system in cities of Shandong Province

### 3.3 讨论

2021 年山东省水资源关联系统耦合协调度较 2010 年水平提高了 17.5%，但区域发展水平不均衡，仍有较大发展空间。为了实现水资源关联系统长期的、动态的、更优的耦合协调发展，山东省应在以下 3 个方面开展工作：一是继续加快推进国家水网及各区域水资源配置工程的完善，实现病险水库清淤排险，严控水资源开发利用强度并注重地下水的合理开采，减弱水资源子系统发展不均衡的问题；二是积极响应国家发展战略，调整经济社会产业结

构和提高用水效率，优化节水模式，尤其是在鲁西北地区，继续稳步提升经济社会的发展水平；三是结合山东省发展规划，实现污染在源头的控制和推进污染防治工作，使经济社会发展生态化以及加大生态环境保护工作。

山东省水资源关联系统耦合协调整体发展水平呈现增长变化趋势，且其协调发展评价等级及其子系统发展水平评价结论与王延梅等<sup>[18]</sup>研究结果相一致，同时水资源关联系统耦合协调度在 2014 年出现突变点的结论与杨金月<sup>[33]</sup>研究结果有较好的一

致性。因此本文提出的云耦合协调模型能表现出较好的适应性,可为区域水资源关联系统协调性动态评价与时空变化特征分析提供模型方法。未来运用云耦合协调模型评价可以考虑指标间物理机制的关联性,辨识水资源关联系统之间互馈作用关系,并开展区域水资源关联系统协调发展障碍因子识别,制定更具有针对性的水资源关联系统协调发展的措施方案。

## 4 结论

本文通过正态云隶属度函数构造云耦合协调模型,结合云相似度准则来判定水资源关联系统耦合协调度的定性评价等级,同时采用耦合协调度、综合评价指数的评价结果云的期望值定量分析长序列过程变化,实现了水资源关联系统耦合协调发展的定性定量评价,取得以下结论:

山东省水资源关联子系统的综合评价指数之间具有一定差异,但总体上呈现上升变化趋势。水资源子系统的综合评价指数呈现波动性变化,在 2014 年和 2019 年出现低值后平稳上升,经济社会和生态环境子系统的综合评价指数呈现平稳上升变化,均在 2021 年达到最大值,分别为 0.634 和 0.456。

山东省水资源关联系统耦合协调度整体呈现上升变化趋势,由 2010 年的 0.608 逐步提升到 2021 年的 0.715,协调发展等级由初级协调水平逐渐迈入中级协调水平,使得水资源、经济社会、生态环境等子系统之间呈现良好的协调发展能力,实现了近十年来由低水平的相互制约关系发展到较高水平的相互促进关系的转变。

山东省各地市水资源关联系统的耦合协调度在空间上呈现东部高西部低的分布特征,在不同阶段耦合协调发展水平地域性差异性较为明显,整体上由高到低为胶东半岛地区>鲁中南地区>鲁西北地区。山东省应加强推进鲁西北平原区的水资源-经济社会-生态环境关联系统协调发展,促进全省水资源关联系统空间均衡协调发展。

### 参考文献:

[1] 张茵,王婷,游进军,等.全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析[J].水利水电技术(中英文),2023,54(1):64-74. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.006.

[2] 刁艺璇,左其亭,马军霞.黄河流域城镇化与水资源利用水平及其耦合协调分析[J].北京师范大学学

报(自然科学版),2020,56(3):326-333. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020166.

- [3] 左其亭,杨振龙,路振广,等.引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):39-47. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0005.
- [4] 李艳明,方红远,侯金甫,等.苏州市水资源-经济-环境-再生水系统耦合协调分析[J].水利水电技术(中英文),2023,54(4):108-119. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.010.
- [5] 郭佳航,田进宽,左其亭,等.沙颍河流域水资源利用量与经济发展匹配特征分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):487-495. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0052.
- [6] 张礼兵,康传宇,金菊良,等.供需双侧调控下水稻灌区水-能源-粮食系统耦合协调评价与优化研究[J].水利学报,2023,54(7):829-842. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20221010.
- [7] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.01.
- [8] WANG Y R, SONG J X, ZHANG X X, et al. Coupling coordination evaluation of water-energy-food and poverty in the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 614(PA): 128461. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128461.
- [9] FENG L, GUO M, WANG W, et al. Evaluation of the effects of long-term natural and artificial restoration on vegetation characteristics, soil properties and their coupling coordinations[J]. Science of the Total Environment, 2023, 884: 163828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163828.
- [10] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等.河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J].湖泊科学,2022,34(3):919-934. DOI: 10.18307/2022.0314.
- [11] 苏莹,董增川,崔璨,等.湖南省“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统协调发展评价[J].中国农村水利水电,2023(7):63-73. DOI: 10.12396/znsd.221761.
- [12] 丁菊,柳西波,何凯.宁夏黄河流域生态系统服务权能协同及其与人类活动强度的关联性研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(7):171-182. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.07.015.
- [13] 蔡振华,耿冉,王海军,等.城市化与水资源耦合协调关系及影响因素研究[J].人民黄河,2024,46(2):

- 87-92. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2024.02.015.
- [14] 白露, 吴成国, 金菊良, 等. 基于Logistic关联分析的水资源承载力评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(12): 43-49. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.12.011.
- [15] 吴丹, 刘孟瑶. 基于DPSIR模型的黄河中游水资源与经济协调发展评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 91-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.02.017.
- [16] SUN C, ZHANG S, SONG C, et al. Investigation of dynamic coupling coordination between urbanization and the eco-environment: A case study in the Pearl River Delta area[J]. Land, 2021, 10(2): 190. DOI: 10.3390/land10020190.
- [17] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254. DOI: 10.5846/stxb201306021271.
- [18] 王延梅, 曹升乐, 于翠松, 等. 水资源系统与社会经济生态系统协调性评价[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 110-113. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2015.03.030.
- [19] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004(8): 28-34. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2004.08.006.
- [20] 方娜, 游清徽, 刘玲玲, 等. 基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6314-6321. DOI: 10.5846/stxb201808221790.
- [21] 李宛谕, 黄显峰, 阎玮, 等. 基于组合权重云模型的调水工程洪水资源利用风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 57-65. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0125.
- [22] 季晓翠, 王建群, 傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 74-79. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.012.
- [23] 张丽洁, 康艳, 粟晓玲. 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2019.01.016.
- [24] 秦明慧, 刘秀丽. 海河流域水环境安全评价及动态耦合协调度分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 63-73. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2022696.
- [25] 梁霄, 巨文慧, 孙博闻, 等. 基于AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价: 以廊坊市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2): 352-364. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0036.
- [26] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 67-74. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006.
- [27] 贾守东, 郑从奇, 庄会波, 等. 基于DPSIR模型的沂水资源可持续利用评价[J]. 水文, 2022, 42(3): 61-66. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210400.
- [28] 何金平, 高全, 施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2977-2983. DOI: 10.12011/1000-6788(2016)11-2977-07.
- [29] 刘桂花, 宋承祥, 刘弘. 云发生器的软件实现[J]. 计算机应用研究, 2007(1): 46-48. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2007.01.013.
- [30] 仕玉治, 李福林, 陈华伟, 等. 地下水利用与保护关键技术创新及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2022.
- [31] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1100-1114. DOI: 10.11821/dlyj201806004.
- [32] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. DOI: 10.11821/dlxb202104013.
- [33] 杨金月. 黄河下游水资源-经济-环境系统耦合协调性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2023.000404

## Dynamic evaluation of water resources correlation system coordination based on cloud coupling coordination model

ZHAO Lijie<sup>1,4</sup>, SHI Yuzhi<sup>1,2</sup>, LI Fulin<sup>1,2</sup>, HUANG Jiwen<sup>1,2</sup>, QIAN Xiuhong<sup>3</sup>, LI Mingyang<sup>1,2</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 2. Key Laboratory of Water Resources and Environment of Shandong Province, Jinan 250013, China; 3. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250100, China; 4. College of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** In recent years, many scholars have studied the coordinated evaluation of water resources linkage system, mainly focusing on water-economic society, water-energy-food, water-vegetation-soil, water-economy-ecology and

other fields. The research scale mainly involves watershed scale and regional scale, and the evaluation method mainly adopts qualitative evaluation. Generally speaking, there are different combinations of grey correlation degree, pressure-state-response model, coupling coordination model, distance coordination degree and so on. It is well known that qualitative evaluation methods have certain ambiguity in the process of constructing evaluation index system and quantitative evaluation criteria. The uncertainty cloud theory proposed by LI Deyi in China can fully describe the uncertainty of qualitative and quantitative indicators and realize the mutual transformation of qualitative and quantitative processes. It was less applied in the evaluation of coupling coordination of water resources correlation systems. Therefore, cloud theory is introduced to construct cloud coupling coordination model to analyze and evaluate the coordination of water resources correlation systems, which makes the evaluation results more generalized.

The index system of water resources correlation system including 21 indexes was established. The entropy weight-analytic hierarchy process combination method was used to determine the weight of the evaluation index. The cloud uncertainty theory was introduced to construct the cloud coupling coordination model. The cloud similarity was used to quantitatively give the evaluation results of coupling coordination degree of water resources correlation system. Compared with the traditional coupling coordination model, it had better adaptability and generalization. Taking Shandong Province as an example, the spatial and temporal variation characteristics of coordination between water resources correlation systems from 2010 to 2021 were analyzed.

The comprehensive evaluation index of the economic and social subsystem was also growing, reaching a maximum of 0.634 in 2021; the comprehensive evaluation index of the ecological environment subsystem was only 0.237 at the beginning of 2010. The coupling coordination degree of water resources correlation system in Shandong Province has been continuously improved as a whole, from 0.608 in 2010 to 0.715 in 2021, realizing the transition from primary coordination to intermediate coordination. In space, the coupling coordination degree of each city in the province showed the distribution characteristics of high in the east and low in the west, and the coupling coordination degree had been continuously improved with time.

The coupling and coordinated development ability of Jinan City and Qingdao City is the best, reaching a good coordination level. The coupling and coordinated development ability of Dezhou City and Binzhou City is relatively slow, maintaining at the primary coordination level. In the future, Shandong Province should strengthen the coordinated development of water resources correlation systems in the northwest plain of Shandong Province and promote the spatial balance of the whole province.

**Key words:** cloud coupling coordination model; water correlation system; coordination degree; dynamic evaluation; Shandong Province