



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.030

张黎明, 赵岩, 王红瑞, 等. 基于信息熵与灰关联的西安市城市经济与用水结构的耦合度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 186-192. ZHANG Li ming, ZHAO Yan, WANG Hong rui, et al. Study of the relationship between urban economic development and the utilization of water resources in Xi'an City based on information entropy and grey correlation grade[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 186-192. (in Chinese)

# 基于信息熵与灰关联的西安市城市经济与用水结构的耦合度研究

张黎明<sup>1</sup>, 赵岩<sup>2</sup>, 王红瑞<sup>2\*</sup>, 潘成忠<sup>2</sup>

(1. 晋中学院 经济管理学院, 山西 晋中 030600; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 基于2005年-2014年西安市城市用水和经济社会发展的数据, 运用信息熵和灰色关联分析法, 从时间序列上对西安市城市经济发展和用水结构之间的相互关系进行了实证分析。研究表明: 西安市用水结构信息熵不断增长, 单一用水类型的优势性减弱, 系统均衡性增强, 用水结构趋于合理化; 西安市城市经济发展与用水结构之间的关联度都在0.45以上, 说明二者存在很大的相关性; 城市经济与用水结构的耦合度分布在0.6~1之间, 表明城市经济发展与用水结构交互耦合比较紧密; 针对西安市水源利用的供需矛盾, 可采取相应的措施加以控制, 节水技术的创新与推广使用是关键。

**关键词:** 城市经济发展; 用水结构; 信息熵; 灰关联; 耦合度

中图分类号: F205 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)04-0186-07

## Study of the relationship between urban economic development and the utilization of water resources in Xi'an City based on information entropy and grey correlation grade

ZHANG Li ming<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>, WANG Hong rui<sup>2</sup>, PAN Cheng zhong<sup>2</sup>

(1. College of Economic Management, Jinzhong College, Jinzhong 030600, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the water consumption data and economic and social development data of Xi'an City during 2005-2014, the relationship between urban economic development and water consumption structure was analyzed using information entropy and grey correlation method in terms of the time series. The results showed that: the information entropy of Xi'an water structure was growing; the advantage of a single water consumption type was weakening; and the system balance was improving. The water consumption structure was becoming more reasonable. The correlation coefficients between the economic development and water structure of Xi'an were all above 0.45, suggesting significant correlations. The coupling degrees between urban economy and water structure were between 0.6 and 1, indicating a relatively close interactive coupling between urban economic development and water consumption structure. We suggest taking corresponding measures to control and ensure the balance between water supply and demand in Xi'an, and the key to doing so is to create and promote water saving technologies.

**Key words:** urban economic development; water consumption structure; information entropy; grey correlation; coupling degree

收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-09-13 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279006; 51479003)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51279006; 51479003)

作者简介: 张黎明(1982-), 女, 湖北襄樊人, 讲师, 主要从事水利经济方面研究。E-mail: 2654599073@qq.com

通讯作者: 王红瑞(1963-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文过程不确定性分析方面研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

水资源是社会经济发展的重要资源,水资源利用状况直接影响着城市经济的可持续发展,城市经济的发展也会在一定程度上对水资源利用结构产生影响<sup>[1]</sup>。水资源短缺问题是当今世界普遍面临的主要水危机,其中水贫困指数可以作为定量评价某一国家或地区间相对缺水程度的重要指标,而我国水贫困与经济贫困属于中度以上耦合的省市占全国省市总数的 90.3%,且二者耦合程度随经济发展水平的高低呈由东南部地区至西北地区逐渐减弱的趋势<sup>[2]</sup>。陕西省 2012 年水资源公报中数据显示,2012 年陕西省水资源总量为 390.5 亿 m<sup>3</sup>,年末总人口为 3 753 万人,人均水资源占有量为 1 041 m<sup>3</sup>,约占国内人均水平的 50%。人均占有水资源量为 1 000 m<sup>3</sup> 是国际公认的重度缺水警戒线<sup>[3]</sup>,由此可以看出,陕西省近乎于重度缺水地区。水资源时空分布不均、用水总量的增长又加剧了陕西省水资源的供需矛盾,水资源问题已经严重制约了城市经济的发展。现有国内外研究针对区域用水结构和国民经济产业结构相互影响的文献相对较少,多集中在水资源利用和国民经济发展之间关系及其演变相互影响规律方面<sup>[4-7]</sup>。

行政区域内的水资源问题的研究方向不够完善,如对陕西省水资源的研究主要包括水资源价值核算<sup>[8]</sup>、水资源承载力研究<sup>[9]</sup>、水资源短缺风险评价<sup>[10]</sup>、水资源供需平衡分析<sup>[11]</sup>以及水资源的可持续发展研究<sup>[12]</sup>等,但从时间序列上对城市经济发展与水资源利用结构系统演变之间的关系分析还相对较少。本研究以西安市作为研究对象,选取了 2005 年 - 2014 年西安城市经济发展主要指标与用水结构指标的相关数据,利用信息熵、灰色关联法以及系统耦合的耦合度模型,分析了城市经济发展和用水结构之间的相互关系,对优化西安市水资源配置,缓解水资源供需矛盾提供理论依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源与指标选取

为了能较为全面的分析西安市城市经济发展与水资源利用之间的关系,本文以构建区域经济发展指标体系和用水结构演变指标体系的原则为指导,依据科学性和指标的可获性原则,选取了农业用水( $X_1$ )、工业用水( $X_2$ )、居民生活用水( $X_3$ )、城镇公共用水( $X_4$ )和生态环境用水( $X_5$ ) 5 个指标来反映水资源利用结构的变化,同时,本文选取了城市化率( $Y_1$ )、人均 GDP( $Y_2$ )、城镇居民人均可支配收入( $Y_3$ )、第一产业产值比重( $Y_4$ )、第二产业产值比重

( $Y_5$ )、第三产业产值比重( $Y_6$ )、万元 GDP 用水量( $Y_7$ )、工业增加值增长率( $Y_8$ )、规模以上工业万元 GDP 用水量( $Y_9$ )、工业用水重复利用率( $Y_{10}$ )、农田灌溉亩均用水量( $Y_{11}$ )、城镇生活污水排放( $Y_{12}$ )、耕地面积( $Y_{13}$ ) 13 个指标来反映西安市城市经济发展。本文数据均来源于《陕西省水资源公报》和《陕西统计年鉴》。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 信息熵的基本原理

熵的概念来源于热力学,是用来表达分子状态杂乱程度的一个物理量。1948 年,Shannon 将熵的概念引入信息论,用以衡量系统的复杂度。一个系统越是有序,信息熵就越低,反之亦然。当系统出于某种状态的概率为  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 时,假设每种状态出现的概率  $p_i$  用各类用水所占比重来表示,满足  $\sum p_i = 1$  且  $p_i \neq 0$ , 该系统的熵就定义为:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^m p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

式中:  $H(x)$  为系统信息熵(nat),  $p(x_i)$  为系统处于某种状态的概率。为了反映各类用水量的均衡程度,引入了均衡度( $J$ )的概念,则有

$$J = H/H_m = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i / \ln N \quad (2)$$

式中:  $H_m = \ln N$ , 式中  $H_m$  为用水结构系统最大信息熵;  $N$  为水资源利用类型。均衡度( $J$ )与系统信息熵( $H$ )呈正比,均衡度( $J$ )越大表示水资源利用过程中单一用水类型的优势性越弱,系统结构越复杂,水资源系统越均衡<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.2 灰色关联分析

灰色关联是指事物之间的不确定性关联或系统因子之间、因子对主体行为之间的不确定性关联<sup>[14]</sup>。其具体计算过程如下:

(1) 确定反映系统行为特征的变量数据系列和相关因素变量数据系列。

(2) 对数据系列进行无量纲化处理,分别用同一序列的第一个数值去除以各个原始数据,得出一个新的数据系列。

(3) 计算灰色关联系数,用  $\xi_i(k)$  表示。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (3)$$

式中:  $k=1, 2, \dots, 10$ ;  $i$  为比较数列个数;  $|X_0(k) - X_i(k)|$  是参考数列与第  $i$  个比较数列对应的第  $k$  个数据的绝对差,  $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两级

最小差,  $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两级最大差,

$\rho \in (0, 1)$ ,  $\rho$  为分辨系数, 取  $\rho = 0.5$ 。

(4) 计算关联度。

关联度分析是对两个指标的时间序列数据进行几何关系比较, 关联度即为比较数列与参考数列在各个时期的关联系数的平均值, 则有

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (4)$$

式中:  $N$  为时间序列个数<sup>[10]</sup>

### 1.2.3 耦合度模型

耦合是指两个或两个以上的系统之间通过各种相互作用而彼此影响, 相互依赖、相互协调、相互促进的动态关联关系<sup>[15]</sup>。为进一步分析城市经济发展与用水结构之间的相互耦合关系, 采用系统关联的耦合度模型来分析系统间的耦合关联。计算公式如下:

$$C(t) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_{ij}(t) \quad (5)$$

式中:  $m$  和  $n$  分别表示城市经济发展指标数目和用水结构指标数目;  $C(t)$  为城市经济与用水结构的耦合度。当  $0 < C \leq 0.3$  时, 系统处于低水平耦合阶段, 当  $0.3 < C \leq 0.5$  时, 系统处于颤颤阶段, 当  $0.5 < C \leq 0.8$  时, 系统处于磨合阶段, 当  $0.8 < C \leq 1$  时, 系统处于高水平耦合阶段<sup>[16]</sup>。

## 2 西安市城市经济发展与水资源利用结构

### 2.1 城市经济发展

据已有资料统计显示, 2005 年西安市年末总人口为 741.73 万人, 城市化率为 63.3%, 2014 年西安市年末总人口为 815.29 万人, 城市化率为 72.6%, 城市化率与 2005 年相比增加了约 9.3 个百分点, 年末总人口年均增长率为 1.05%, 呈直线上升趋势 (图 1)。

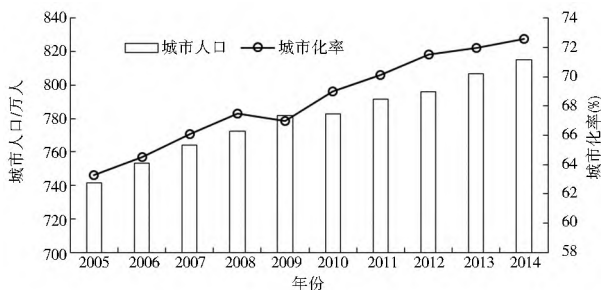


图 1 2005 年-2014 年西安市城市人口与城市化率变化

Fig. 1 The changes of urban population and urbanization rate of Xi'an in 2005-2014

2005 年-2014 年间, 西安市进入了城市经济的快速发展轨道。GDP 从 1 313.93 亿元增长至

5 492.64 亿元, 年均增长率为 17.2%。城镇居民人均可支配收入在 2005 年-2014 年间以年均 15.8% 的速度快速增长, 2014 年达到 3.61 万元。城市经济结构进一步优化, 三次产业状况更为合理。第一产业比重有所下降, 2005 年为 5.02%, 2014 年下降为 3.91%, 下降了 1.11 个百分点。第二产业比重下降, 2014 年比 2005 年下降了 1.18 个百分点, 虽然个别年份有所上升, 但总体趋于下降。第三产业比重持续上升, 2005 年为 53.84%, 2014 年为 56.13%, 年均增长率为 0.5%。经济发达程度和第三产业所占比例往往成正比, 2014 年西安市第三产业比重超过第二产业比重近 20 个百分点, 这预示经济发展新方向, 说明西安市将逐步转变为以第三产业领先发展的经济中心城市, 有利于西安市实现经济的良性循环 (图 2)。

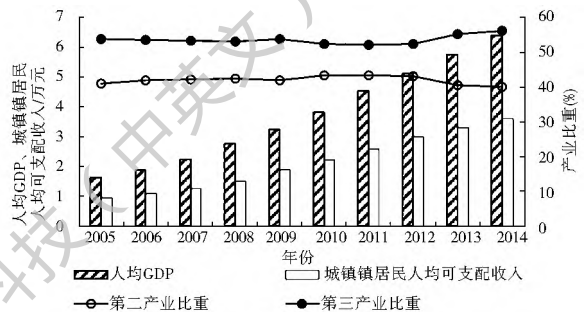


图 2 2005 年-2014 年西安市主要社会经济发展指标变化

Fig. 2 The changes of the main social and economic development indicators of Xi'an in 2005-2014

### 2.2 西安市水资源利用结构

#### 2.2.1 西安市水资源利用现状

2005 年-2014 年间, 西安市水资源利用的变化情况如下 (表 1):

(1) 2014 年西安市用水总量为 17.46 亿  $m^3$ , 其中, 比重最大的农业用水占了 36.8%, 其次是居民生活用水和工业用水, 占比分别为 25.9% 和 20.3%; 城镇公共用水和生态环境用水所占比重较小。

(2) 西安市水资源利用结构变化明显, 其中农业用水占比 2005 年为 49%, 2014 年下降至 36.8%, 下降了 12.2 个百分点; 工业用水占比 2005 年为 26%, 2014 年下降至 20.3%, 下降了 5.7 个百分点; 居民生活用水占比增加了 9.14 个百分点, 用水量年均增长率为 6.18%; 城镇公共用水占比增加了 1 个百分点; 生态环境用水从 2005 年的 0.36 亿  $m^3$  增加到了 2014 年的 1.61 亿  $m^3$ , 年均增长率为 18.1%, 上升趋势明显。

(3) 农业用水量和工业用水量呈下降趋势, 但

陕西省仍然是农业大省,加之农业灌溉技术相对落后,农业用水在西安市用水总量中仍然占主要比重。第三产业的发展、城市人口规模的扩张将促使西安市居民生活用水持续增加<sup>[17]</sup>。生态环境用水是指

为生态环境修复与建设以及维持生态平衡所需要的最小用水量。生态环境用水量增加说明人们已认识到水资源生态功能的重要性,对城市生态环境建设日益重视。

表 1 2005 年-2014 年西安市水资源利用结构变化  
Tab. 1 The changes of water resources use structure of Xi'an in 2005-2014

年份		农业用水	工业用水	居民生活用水	城镇公共用水	生态环境用水	用水总量
2005	水量/亿 m <sup>3</sup>	7.62	4.01	2.64	1.06	0.36	15.69
	占比(%)	49.0	26.0	16.8	6.8	2.3	100
2008	水量/亿 m <sup>3</sup>	7.51	4.92	2.92	1.22	0.49	17.06
	占比(%)	44.0	28.8	17.1	7.2	2.9	100
2011	水量/亿 m <sup>3</sup>	6.33	3.53	3.99	1.23	1.03	16.12
	占比(%)	39.3	21.9	24.8	7.6	6.4	100
2014	水量/亿 m <sup>3</sup>	6.24	3.54	4.53	1.36	1.61	17.46
	占比(%)	36.8	20.3	25.9	7.8	9.2	100
2005-2008		-5.0	2.8	0.3	0.4	0.6	
2008-2011		-4.7	-6.9	7.7	0.4	3.5	
2011-2014	比重净增减(%)	-2.5	-1.6	1.14	0.2	2.8	
2005-2014		-12.2	-5.7	9.14	1.0	6.9	

### 2.2.2 基于信息熵的西安市用水结构演变分析

根据上述方法,利用 2005 年-2014 年西安市各类型用水数据,计算了信息熵和均衡度,结果见表 2。除个别年份以外,西安市用水结构信息熵和均衡度总体上呈逐年递增的趋势。信息熵与均衡度值于 2014 年分别达到最大值 1.460 1 nat 和 0.907 3,说明西安市用水结构在加速无序发展的同时,均衡度有所增加,用水系统受某一种用水类型的影响越来越小,系统稳定性增加。

算结果见表 3。

表 2 西安市 2005-2014 年用水结构信息熵计算结果

Tab. 2 Results of information entropy of water utilization structure of Xi'an in 2005-2014

年份	信息熵/nat	均衡度
2005	1.269	0.788 5
2006	1.2913	0.802 4
2007	1.299 7	0.807 6
2008	1.400 5	0.870 2
2009	1.262 5	0.784 5
2010	1.328 2	0.825 3
2011	1.417 2	0.880 6
2012	1.414 2	0.878 7
2013	1.453 4	0.903 1
2014	1.460 1	0.907 3

## 3 城市经济发展与水资源利用的关系分析

### 3.1 城市经济发展与水资源利用关联性分析

西安市城市经济发展与水资源利用的关联度计

表 3 城市经济发展指标与用水结构指标的灰关联度

Tab. 3 Grey correlation grade of urban economic development indicators and water consumption structure indicators

r	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	Y <sub>10</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>
X <sub>1</sub>	0.85	0.58	0.55	0.91	0.88	0.87	0.75	0.87	0.76	0.85	0.93	0.79	0.91
X <sub>2</sub>	0.77	0.54	0.52	0.83	0.80	0.79	0.81	0.84	0.78	0.78	0.84	0.71	0.82
X <sub>3</sub>	0.66	0.70	0.59	0.61	0.64	0.65	0.47	0.62	0.47	0.64	0.61	0.70	0.70
X <sub>4</sub>	0.87	0.54	0.51	0.87	0.87	0.90	0.67	0.76	0.65	0.85	0.85	0.79	0.87
X <sub>5</sub>	0.70	0.78	0.79	0.69	0.70	0.70	0.62	0.66	0.62	0.68	0.69	0.70	0.7

(1) 按照关联度介于 0~0.35 之间为弱关联、介于 0.35~0.65 之间为中关联、介于 0.65~1 之间为强关联的标准,水资源利用结构与城市经济发展

的 18 个指标 65 个关联值中,有 16 个呈现中度关联,有 49 个呈现强关联。这说明本文所选的 13 个城市经济发展指标与西安市各类用水的相关性都很

高,符合进行关联分析的基本要求。

(2) 西安市产业结构的变化主要体现在三次产业产值比重的变化上。第一产业产值比重( $Y_4$ )、第二产业产值比重( $Y_5$ )、第三产业产值比重( $Y_6$ )三个指标与各类用水的关联度值普遍较高,其中强关联出现的次数占所有强关联个数的 27%。2005-2014 年西安市农业用水和工业用水量呈下降趋势,居民生活用水量增加,这和产业比重变化趋势一致(图 3)。

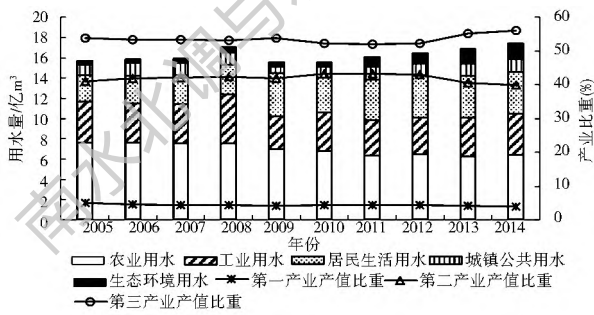


图 3 2005-2014 年西安三次产业产值与各类用水量变化  
Fig. 3 The changes of the proportions of the three sectors in Xi'an and the water consumption of each type in 2005-2014

(3) 第一产业产值比重( $Y_4$ )、农田灌溉亩均用水量( $Y_{11}$ )、耕地面积( $Y_{13}$ )三个指标与农业用水的关联度值分别为 0.91、0.93、0.91,说明这三者较其他经济指标对农业用水量变化的影响较大。西安市 2005 年-2014 年农业总产值、耕地面积和有效灌溉面积变化情况见图 4。2005 年-2014 年间,西安市耕地面积逐年递减,由 2005 年的 400.17 万亩,减少到了 2014 年的 360.73 万亩,第一产业比重下降与农业耕地面积减少有直接关系,而耕地面积减少又直接导致了西安市农业用水量的下降。在陕西省农业用水总量中,农灌用水量占绝大部分,而陕西省农业灌溉用水量在相当程度上依赖于地下水资源开采,这直接导致了地下水位的下降,有效灌溉面积减少,农业减产,进而又对农业用水量产生影响。

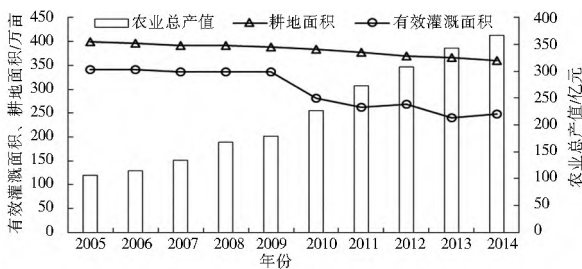


图 4 2005 年-2014 年西安市农业总产值、耕地面积和有效灌溉面积变化

Fig. 4 The changes of gross agricultural output value, cultivated area, and effective irrigation area of Xi'an in 2005-2014

用水( $X_4$ )的关联值中,强关联出现的次数占所有强关联个数的 33%,这说明城市经济的发展对这两类用水量变化的影响较大。西安市将城市经济发展发展定位于国际大都市,这就从客观上对产业结构升级提出了更高的要求,“三、二、一”的产业结构有利于西安市城市化水平的提高。近年来,西安市加快了现代服务业与旅游业的发展力度,来西安旅游的人数不断增加,这直接导致了餐饮、住宿、娱乐等行业用水量增加。西安市拥有区域内高等院校众多的优势资源,学校用水尤其是学校洗浴用水是西安市生活用水的重要组成部分。人均 GDP 和第三产业比重对用水效率有正的影响<sup>[18]</sup>,从用水效益来看,西安市万元 GDP 用水量呈现下降趋势(图 5),万元 GDP 用水量 2005 年为 134.7 m<sup>3</sup>/万元,2014 年降为 31.9 m<sup>3</sup>/万元,下降趋势明显。

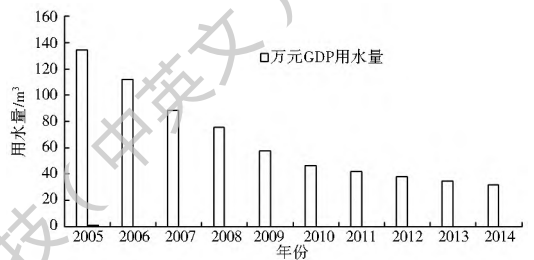


图 5 2005 年-2014 年西安市万元 GDP 用水量变化  
Fig. 5 The changes of water consumption per 10 000 yuan GDP of Xi'an in 2005-2014

### 3.2 城市经济发展与用水结构耦合度的时序分析

耦合度可以用来衡量城市经济各项指标与用水结构之间相互作用强度的大小<sup>[19]</sup>,耦合度越大,说明系统之间相互作用越强烈,城市经济发展通过非线性相互作用将引起用水结构信息熵的大幅度波动,耦合度越小,说明子系统间协调性越高,城市经济发展变化在短期内不会引起用水结构发生较大波动。根据式(5),计算 2005 年-2014 年西安市城市经济发展与用水结构的耦合度,结果见表 4:

表 4 西安市 2005 年-2014 年城市经济发展与用水结构的耦合度变化

Tab. 4 The changes of the coupling degree between urban economic development and water consumption structure of Xi'an in 2005-2014

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
耦合度	0.64	0.64	0.61	0.63	0.72	0.78	0.68	0.68	0.63	0.61

西安市 2005 年-2014 年城市经济发展与用水结构的耦合度分布在 0.5~0.8 之间,反映了城市经济发展与用水结构有非常紧密的交互耦合,子系统间处于磨合阶段。

## 4 结语

在对西安市城市经济发展及水资源利用现状进行分析的基础之上,选取相关指标,利用灰关联模型和耦合度模型对城市经济发展和用水结构的相互关系进行了实证研究,结果表明:

(1) 水资源利用与城市经济发展整体上有较强的相关性,城市发展过程中产业结构调整对水资源利用结构变化的推动作用较大,产业结构升级在一定程度上可以有优化城市用水结构。西安市第一、二产业的萎缩带来了工农业用水的绝对降低,第三产业比重的增长使得生活用水逐年递增。

(2) 产业用水效率的提高对城市用水结构的变化也发挥着至关重要的作用。应进一步压缩高耗能、高污染行业的绝对规模,大力发展高效节水农业,提高工业用水重复利用率,降低农田灌溉亩均用水量以及工业万元GDP用水量,节水技术的创新与使用将是降低水资源消耗的主要推动力。

(3) 城市经济的发展与水资源利用呈现高度耦合关系,耦合阶段处于磨合期。城市发展给水资源利用带来压力的同时,也使得城市更具有能力进行环保投资。应把节水减排作为调整经济结构、转变经济发展方式的重要突破口<sup>[20]</sup>,加大节水投入,积极推广节水灌溉技术,同时,通过节约用水的宣传教育、合理的水价等措施来提高人们的节水意识,降低水资源消耗,有效缓解西安市水资源利用的供需矛盾。

### 参考文献(References):

- [1] Bao C, Fang C. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3): 508-517.
- [2] 王雪妮, 孙才志, 邹玮. 中国水贫困与经济贫困空间耦合关系研究[J]. *中国软科学*, 2011(12): 180-192. (WANG Xue ni, SUN Cai zhi, ZOU Wei. Coupling relation analysis between water poverty and economic poverty in China[J]. *China Soft Science*, 2011(12): 180-192. (in Chinese))
- [3] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 116-120. (ZHANG Li ping, XIA Jun, HU Zhi fang. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [4] 朱洪利, 潘丽君, 李巍, 等. 十年来云贵两省水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 1-5. (ZHU Hong li, PAN Li jun, LI Wei, et al. Decoupling relationship between water use and economic development in Yun
- nan and Guizhou provinces during the first ten years of the great western development strategy[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(5): 1-5. (in Chinese))
- [5] 成琨, 付强, 陈曦, 等. 基于投入产出模型的黑龙省水资源利用效率分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 141-145. (CHENG Kun, FU Qiang, CHEN Xi, et al. Analysis of water resources utilization efficiency in Heilongjiang province based on input output model[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(5): 141-145. (in Chinese))
- [6] 张兵兵, 沈满洪. 工业用水与工业经济增长, 产业结构变化的关系[J]. *中国人口资源与环境*, 2015, 25(2): 9-14. (ZHANG Bing bing, SHEN Man hong. Relationship between the industrial water usage and the industrial economic growth and the industrial structural change[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(2): 9-14. (in Chinese))
- [7] 吴丽, 田俊峰. 区域产业结构与用水协调的优化模型及评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(4): 51-54. (WU Li, TIAN Jun feng. Optimal model of coordination between industrial structure and water resources utilization as well as its evaluation[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(4): 51-54. (in Chinese))
- [8] 高鑫, 解建仓, 汪妮, 等. 基于物元分析与替代市场法的水资源价值量核算研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(5): 224-230. (GAO Xin, XIE Jian cang, WANG Ni, et al. Accounting the value of water resources based on the matter element and alternative market method[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(5): 224-230. (in Chinese))
- [9] 王静, 周庆华. 西安段秦岭北麓旅游水资源承载力[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2015, 45(6): 996-1000. (WANG Jing, ZHOU Qing hua. North Qinling Mountains Xi'an tourism carrying capacity of water resources in the area[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2015, 45(6): 996-1000. (in Chinese))
- [10] 严伏朝, 解建仓, 秦涛, 等. 基于信息扩散理论的水资源短缺风险评价[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3): 285-289. (YAN Fu chao, XIE Jian cang, QIN Tao, et al. Risk evaluation of water shortage based on information diffusion theory[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3): 285-289. (in Chinese))
- [11] 张欣莹, 刘建林, 李晓辉, 等. 西安市供用水现状及水资源供需平衡分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(6): 38-42. (ZHANG Xin ying, LIU Jian lin, LI Xiao hui, et al. Analysis of water use status and supply-demand balance of water resources in Xi'an[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(6): 38-42. (in Chinese))
- [12] 史兴民, 温文娟. 基于水资源的陕西生态安全基尼系数分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2010(4): 233-236. (SHI Xing min, WEN Wen juan. Gini coefficient of ecological security of Shaanxi based on water resources[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010(4): 233-236. (in Chinese))

- [13] 刘燕, 胡安焱, 邓亚芝. 基于信息熵的用水系统结构演化研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 141-144. (LIU Yan, HU An yan, DENG Ya zhi. Study on the evolution of water resource structure based on information entropy[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2006, 34(6): 141-144. ( in Chinese))
- [14] 沈永跃. 河南省经济增长和教育发展的灰色关联度分析[J]. 技术经济, 2009, 28(7): 105-108. (SHEN Yong yue. Grey relational grade analysis on relationship between education development and economic growth in Henan province[J]. Technology Economics, 2009, 28(7): 105-108. ( in Chinese))
- [15] 孙爱军, 董增川, 张小艳. 中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 446-453. (SUN Ai jun, DONG Zeng chuan ZHANG Xia yan. Coupling degree between urban economy and technical efficiency of water use in China[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 446-453. ( in Chinese))
- [16] 李英俊, 赵安周, 卫海燕, 等. 西安市城市化与生态环境协调发展研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(8): 125-129. (LI Ying jun, ZHAO An zhou, WEI Hai yan, et al. Study on coordinated development between urbanization and ecological environment of Xi'an city[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(8): 125-129. ( in Chinese))
- [17] 张静, 秦公伟. 西安市用水结构变化及驱动力分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 87-90. (ZHANG Jing, QIN Gong wei. Driving forces of change of water consumption structure in Xi'an city[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 87-90. ( in Chinese))
- [18] 孙才志, 王言鑫. 辽宁省用水效率动态变化的 Malmquist 指数分析[J]. 统计与决策, 2008(14): 108-110. (SU N Cai zhi, WANG Yan xin. Water use efficiency in Liaoning province of Malmquist index analysis[J]. Statistics and Decision, 2008(14): 108-110. ( in Chinese))
- [19] 盖美, 刘伟光, 田成诗. 中国沿海地区海陆产业系统时空耦合分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5). (GAI Mei, LIU Wei guang, TIAN Cheng shi. Spatial-Temporal coupling on marine and land industrial systems in coastal regions of China[J]. Resources Science, 2013, 35(5). ( in Chinese))
- [20] 何慧爽. 河南省用水结构演变与驱动因子灰色关联研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(2): 50-53. (HE Hui shuang. Analysis of water utilization structure evolution and its driving forces based on grey relation degree in Henan province[J]. Yellow River, 2015, 37(2): 50-53. ( in Chinese))