

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.01.12

# 基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价

——以西安市为例

杨法暄<sup>1,2</sup>, 郑乐<sup>1,2</sup>, 钱会<sup>1,2</sup>, 柳凤霞<sup>1,2</sup>, 王海科<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710064; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 结合西安市水资源现状,从驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个层级选取 11 个指标构建基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价体系,采用熵权法和模糊数学评价方法对西安市分别进行时间和空间维度上的水资源脆弱性评价。结果表明:2007-2017 年西安市水资源脆弱性整体上呈现先下降后上升的趋势,2007-2013 明显下降,2013-2017 升高,除 2013 年为不脆弱状态外,其余年份均为轻度或中度脆弱;2017 年水资源评价结果显示,西安市各地区水资源脆弱性存在明显差异,市区水资源脆弱性最高,周至县最低;优化水资源配置,提高水资源利用率,缓解供需矛盾是降低水资源脆弱性的关键。

**关键词:** 城市水资源; 脆弱性; DPSIR 模型; 熵权法; 西安市

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)01-0077-08

## Vulnerability assessment of urban water resources based on DPSIR model: A case study of Xi'an City

YANG Faxuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Le<sup>1,2</sup>, QIAN Hui<sup>1,2</sup>, LIU Fengxia<sup>1,2</sup>, WANG Haike<sup>1,2</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology Effects in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** According to the current situation of water resources in Xi'an, 11 indicators were selected from five levels of driving forces, namely pressure, state, impact and response to construct the urban water resources vulnerability assessment system based on DPSIR model. The entropy weight method and fuzzy mathematics method were used to evaluate the water resources vulnerability of Xi'an in time and space dimensions, respectively. The results showed that the water resources vulnerability of Xi'an from 2007 to 2017 showed a downward trend and then an upward trend. It decreased significantly from 2007 to 2013, and rose from 2013 to 2017. Except for the non-vulnerable state in 2013, the other years are mild or moderate vulnerable. The water resources evaluation results in 2017 show that the water resources vulnerabilities of different regions is highly differentiated. In contrast, the urban water resources vulnerability is the highest, and Zhouzhi County is the lowest. Optimizing water resources allocation, improving water resources utilization rate and alleviating the contradiction between supply and demand are the key to reducing water resources vulnerability.

**Key words:** urban water resources; vulnerability; DPSIR model; entropy weight; Xi'an City

## 1 研究背景

水资源是人类赖以生存的基础性自然资源,影响着人类生活的方方面面<sup>[1]</sup>。但是,随着经济社会

的快速发展,人口数量急剧上升,加之水污染及水资源浪费等问题引起的水质型水资源短缺导致水资源的可持续发展面临着巨大挑战<sup>[2]</sup>。目前,水资源问题已经成为影响人类永续发展的重大问题之一<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2019-08-18; 修回日期:2019-10-07

基金项目:西安环境水文地质调查评价项目(211529180149)

作者简介:杨法暄(1996-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事水文与水资源方面的研究。

通讯作者:钱会(1963-),男,陕西咸阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文地质方面的研究。

进入 21 世纪以来,我国城镇化水平日益提高,城市规模逐渐扩大,城市人口数量快速增加,城市对水资源的需求也随之加大,很多城市出现了严重的水资源问题<sup>[4-6]</sup>。城市水资源脆弱性评价研究对于城市的社会健康发展、水资源管理以及生态治理具有实际指导意义<sup>[7-8]</sup>。

众多学者针对水资源脆弱性问题进行了大量研究。邹君等<sup>[9]</sup>、王钰等<sup>[10]</sup>使用 GIS 技术对特定区域进行了水资源脆弱性研究。夏军等<sup>[11]</sup>研究了气候变化条件下的水资源脆弱性,并给出了适应性调控方案。胡蓓琳等<sup>[12]</sup>利用同异反层次法联系系数建立了流域水资源系统脆弱性评价的集对分析模型,并对巢湖流域水资源系统脆弱性进行了综合评价。Chang 等<sup>[13]</sup>、Sanchez-Torres 等<sup>[14]</sup>、Perveen 等<sup>[15]</sup>分别从不同角度对不同河流的水资源脆弱性进行了系统评价。上述学者主要以流域或某特定地形区域为研究对象,还有许多学者主要从事城市的水资源脆弱性研究工作。

朱怡娟<sup>[7]</sup>运用水资源脆弱性模糊综合评价模型,对武汉市 2003-2013 年水资源系统的脆弱性所出现的动态变化进行了分析,针对武汉市提出了降低水资源脆弱性的对策。职璐爽等<sup>[8]</sup>在应用熵权法计算权重的基础上利用线性加权求和法对广东省水资源脆弱性进行了评价,并根据评价结果提出了建设智慧水务的建议。然而,以往研究多侧重于从时间或者空间单方面维度对研究区域进行水资源脆弱性的评价,往往忽视时空的结合。

本文针对西安市水资源现状,利用西安市统计资料,基于 DPSIR 指标选取模型筛选出 11 个评价指标,结合熵权法和模糊综合评价法,分别从时间和空间维度上对西安市进行水资源脆弱性综合评价。根据评价结果,提出相应的适应性对策。西安市水资源脆弱性评价研究,对西安市水资源高效管理、海绵城市建设、生态文明城市建设有着重要的现实意义和价值。

## 2 研究区概况

西安,作为丝绸之路经济带和亚欧大陆桥上的重要城市,在“一带一路”建设中占据着桥头堡和核心城市的地位<sup>[16]</sup>。西安市位于关中平原腹地,北濒渭河,南依秦岭,八水润长安,地理坐标北纬 33°39'~34°45',东经 107°40'~109°49'(见图 1),东西长 204 km,南北最大宽约 116 km,面积 10108 km<sup>2</sup>。西安市人均占有水资源量 254.25 m<sup>3</sup>,相当于全国平

均水平的 12.1%,远远低于国际公认的人均年水资源量 500 m<sup>3</sup> 的绝对缺水线,是全国最缺水的地区之一。随着国家中心城市、国际化大都市建设的开展,西安市对水资源的需求量将继续增加,根据《西安市水中长期供求规划》,预测 2020 年西安市需水量将达 25.91 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 而西安市多年平均水资源总量仅为 23.47 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,今后供需矛盾将更加突出。

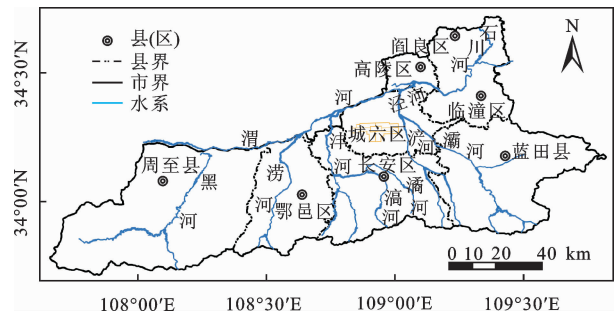


图 1 研究区域概况图

## 3 数据与方法

### 3.1 数据来源

本文西安市各年度以及各区县社会效益与水资源开发利用情况数据来自 2007-2017 年《西安统计年鉴》《西安市水资源开发利用规划》,水资源量以及各项水文数据来自 2007-2017 年《西安市水资源公报》。

### 3.2 DPSIR 指标体系的构建

评价指标的选取在水资源脆弱性评价过程中是非常重要的步骤。现有研究对水资源脆弱性评价指标没有统一标准,但根据以往研究成果可以总结出指标选取时需要遵循的两点原则:第一,要综合考虑数据的易获性和结果的可比性;第二,选择的因素要具有主导性<sup>[17]</sup>。

本文从水资源脆弱性的概念与内涵出发,严格遵循上述两个原则,结合西安市水资源现状以及数据资料的获取情况,基于 DPSIR 概念模型建立了西安市水资源脆弱性评价指标体系。DPSIR 概念模型由联合国于 1993 首次提出<sup>[18]</sup>,它从系统分析的角度看待人与自然之间的相互作用并将表征一个自然系统的多个评价指标分成 5 种类型,即驱动力 (Driving forces)、压力 (Pressure)、状态 (State)、影响 (Impact) 和响应 (Responses)。

西安市水资源脆弱性评价指标体系由 5 部分构成,共包含 11 项指标。评价体系中各项指标的含义见表 1。

表 1 水资源脆弱性评价指标

目标层	准则层	指标层	表征含义
西安市 水资源 脆弱性 评价	驱动力(D)	人均 GDP( $X_1$ ) /元	区域经济发展水平
		人口密度( $X_2$ )/(人·km <sup>-2</sup> )	单位面积人口数量
		城镇化率( $X_3$ ) /%	城镇化水平
	压力(P)	万元工业产值污水排放量( $X_4$ ) /m <sup>3</sup>	工业生产耗水水资源量
		有效灌溉面积占播种比( $X_5$ ) /%	农业灌溉水平
		人均日生活用水量( $X_6$ ) / ( L·d <sup>-1</sup> )	人均生活用水量
	状态(S)	降水量( $X_7$ ) / mm	降水资源丰沛度
		居民生活用水占供水比( $X_8$ ) /%	居民生活用水所占供水比
	影响(I)	供水综合生产能力( $X_9$ ) / (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	城市产水能力
		建成区绿地率( $X_{10}$ ) /%	植被覆盖率
	响应(R)	城市污水综合处理率( $X_{11}$ ) /%	污水处理情况

### 3.3 评价模型的建立

3.3.1 各评价指标权重的确定 在评价指标体系建立之后,需要选择一种合适的方法确定各项评价指标的权重。目前,被广泛应用的方法主要有层次分析法<sup>[19]</sup>、专家调查法、BP 神经网络技术<sup>[20]</sup>以及熵权法<sup>[21]</sup>等。

层次分析法和专家调查法属于主观赋权法,主要依靠评价者主观意愿进行赋权,随意性太强。而客观赋权法可以很好地体现指标数据的原始信息,规避了评价者的主观意愿,熵权法就属于其中一种。本文采取了熵权法进行指标赋权。

熵权法是信息论中经常用到的一种计算指标权重方法。在信息论中,信息是系统有序程度的一种度量,熵代表了系统的无序程度。

当指标的信息熵越小时,指标数据的差异也就越大,表明该项指标对被评价对象的影响作用越大,则该项指标所占的权重就越大。反之,熵越大,指标数据越均衡,表明该项指标对被评价对象的影响作用越小,则该项指标的所占权重也就越小<sup>[22]</sup>。按照下列步骤进行赋权:

(1) 指标数据的标准化。将表 1 中所列 11 个评价指标(  $X_1 - X_{11}$  )按照对水资源脆弱性的影响分为正向指标和负向指标。正向指标是指对水资源脆弱性有降低作用的指标,即正向指标的数值越大,水资源脆弱性越低。反向指标是指对水资源脆弱性有升高作用的指标,即反向指标数值越大,水资源脆弱性越高,越不利于水资源的可持续发展。由此,上述 11 个指标中,有效灌溉面积占播种比、降水量、供水

综合生产能力、建成区绿地率、城市污水综合处理率为正向指标,除此 5 种指标之外其余 6 种指标为负向指标。

对于正向指标,采用下式进行标准化:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (1)$$

对于负向指标,采用下式进行标准化:

$$r_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (2)$$

式中:  $r_{ij}$  为第  $j$  个评价指标下的第  $i$  个评价对象标准化后的值;  $x_{ij}$  为原始数据中第  $j$  个评价指标下第  $i$  个评价对象的数值;  $x_{\max j}$  为第  $j$  个评价价值中的最大值;  $x_{\min j}$  为第  $j$  个评价价值中的最小值。

(2) 构造决策阵

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad (3)$$

式中:  $n$  为评价对象数量;  $m$  为评价指标数量。

(3) 确定指标熵的值

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (4)$$

$$\text{其中, } f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

(4) 确定指标的权重

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (5)$$

其中,  $0 \leq w_j \leq 1$ ;  $\sum w_j = 1$ 。从而,得到指标权重向量  $W$ ,即:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad (6)$$

3.3.2 评价结果的计算 通过熵权法得到各项指标的权重之后,利用模糊数学综合评价法<sup>[23]</sup>计算评价结果。下式表示了该法的基本原理:

$$B = W \cdot R^T \quad (7)$$

式中: $B$ 为输出结果,即模糊综合评价结果; $W$ 为输入,为熵权法得到的指标权向量; $R$ 为模糊关系矩阵,由各单因素经过标准化处理之后组合而成一个 $n \times m$ 阶矩阵。 $\cdot$ 为模糊合成算子,是将 $W$ 与 $R$ 进行合成的方法。具体过程如下式:

$$B = W \cdot R^T$$

$$= (W_1, W_2, \dots, W_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$= (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (8)$$

3.3.3 水资源脆弱性评价标准 目前,在水资源脆弱性评价体系中还没有一套统一的评价标准,前人大都采取研究现状与相关领域专家经验相结合的方法制订适用于所研究特定区域的评价标准<sup>[7]</sup>。本文在参考国际缺水标准的前提下,研究西安市水资源规划相关文件及水资源现状,结合相关专家经验

提出了一套适用于西安市水资源脆弱性评价的等级标准。将评价等级划分为4级,即“不脆弱”、“轻度脆弱”、“中度脆弱”、“严重脆弱”4个等级,如表2所示。

表2 西安市水资源脆弱性评价标准

评价等级	分级标准	脆弱程度
1	$\leq 0.35$	不脆弱
2	0.35 ~ 0.50	轻度脆弱
3	0.50 ~ 0.65	中度脆弱
4	$\geq 0.65$	严重脆弱

## 4 西安市水资源脆弱性评价

利用西安市近年来相关经济效益与水资源动态数据对其进行水资源脆弱性评价,分别得到西安市时间和空间维度上的水资源脆弱性评价结果。

### 4.1 西安市时间维度上的水资源脆弱性评价

4.1.1 时间维度上的各指标权重的计算 基于西安市2007-2017年相关水资源及水文数据资料,采用公式(1)和(2)进行指标数据标准化,得到如下标准化矩阵 $R_{(n \times m)}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0 & 0.3486 & 0.7553 & 0.9162 & 0.7996 & 0.0051 & 0.1717 & 0 \\ 0.9046 & 0.9463 & 0.8117 & 0.8738 & 0.3619 & 0.8969 & 0.3377 & 0.4344 & 0 & 0.2411 & 0.1129 \\ 0.8221 & 0.9080 & 0.6139 & 0.5409 & 0.3162 & 0.5342 & 0.7888 & 0.4143 & 0.2443 & 1.0000 & 0.6154 \\ 0.7157 & 0.8773 & 0.6044 & 0.8418 & 0.5824 & 0.7705 & 0.2686 & 0.2294 & 0.2160 & 0 & 0.7102 \\ 0.5868 & 0.8467 & 0.4543 & 0.9793 & 0.5178 & 0.7906 & 1.0000 & 0.2299 & 0.4347 & 0.1530 & 0.7717 \\ 0.4806 & 0.8160 & 0.2619 & 1.0548 & 0.7484 & 0.0939 & 0.0093 & 0.0570 & 0.5100 & 0.1797 & 0.8862 \\ 0.3739 & 0.7777 & 0.1883 & 0.9421 & 0 & 0 & 0 & 0.2519 & 0.3863 & 0.2794 & 0.9245 \\ 0.2607 & 0.7547 & 0.1119 & 0.9625 & 0.3594 & 1.0000 & 0.7888 & 0.1014 & 0.2418 & 0.3043 & 0.9876 \\ 0.2045 & 0.6934 & 0.00560 & 0.5611 & 0.3454 & 0.7401 & 0.4261 & 0.0000 & 0.7973 & 0.4315 & 0.9604 \\ 0.1202 & 0.5937 & 0 & 0.9025 & 1.0000 & 0.6708 & 0.1071 & 0.0740 & 1.0000 & 0.5133 & 0.9629 \\ 0 & 0 & 0.0013 & 1.0000 & 0.1080 & 0.5200 & 0.7511 & 1.0000 & 0.6680 & 0.6762 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

基于标准化矩阵进行熵值和权重的计算,计算结果如表3。由表3可得指标权向量 $W$ 即:

$$W = (0.0878, 0.0370, 0.1569, 0.0407, 0.0787, 0.0623, 0.1177, 0.1470, 0.1133, 0.0992, 0.0593)$$

### 4.1.2 时间维度上的水资源脆弱性综合评价结果

利用模糊数学算法公式(8)将标准化矩阵 $R$ 与指标权向量 $W$ 进行合成,得到西安市2007-2017年度

时间维度上的模糊综合评价结果向量 $B$ ,计算式与结果如下:

$$B = W \cdot R^T = (0.0878, 0.0370, 0.1569, 0.0407, 0.0787, 0.0623, 0.1177, 0.1470, 0.1133, 0.0992, 0.0593) \cdot$$

1.0000	0.9046	0.8221	0.7157	0.5868	0.4806	0.3739	0.2607	0.2045	0.1202	0
1.0000	0.9463	0.9080	0.8773	0.8467	0.8160	0.7777	0.7547	0.6934	0.5937	0
1.0000	0.8117	0.6139	0.6044	0.4543	0.2619	0.1883	0.1119	0.0560	0	0.0013
0	0.8738	0.5409	0.8418	0.9793	1.0548	0.9421	0.9325	0.5611	0.9025	1.0000
0.3486	0.3619	0.3162	0.5824	0.5178	0.7484	0	0.3595	0.3454	1.0000	0.1080
0.7553	0.8969	0.5342	0.7705	0.7906	0.00939	0	1.0000	0.7401	0.6708	0.5200
0.9162	0.3377	0.7888	0.2686	1.0000	0.0093	0	0.7888	0.4261	0.1071	0.7511
0.7996	0.4344	0.4143	0.2294	0.2299	0.0570	0.2519	0.1014	0	0.0740	1.0000
0.0051	0.0000	0.2443	0.2160	0.4347	0.5100	0.3863	0.2418	0.7973	1.0000	0.6680
0.1717	0.2411	1.0000	0	0.1530	0.1797	0.2794	0.3043	0.4315	0.5133	0.6762
0	0.1129	0.6154	0.7105	0.7717	0.8862	0.9245	0.9876	0.9604	0.9629	1.0000

= (0.5993 0.4960 0.5995 0.4502 0.5457 0.3588 0.2928 0.4220 0.3888 0.4346 0.5192)

由上述计算可得西安市 2007 - 2017 水资源脆弱性模糊综合评价得分,将此计算结果依据水资源脆弱性评价标准(表 2)进行分级得到西安市 2007 - 2017 水资源脆弱性综合评价结果(见表 4)。

表 3 西安市水资源脆弱性评价指标权重计算

隶属层级	评价指标 ( $X_i$ )	熵值 $e_j$	权重 $w_j$
驱动力(D)	人均 GDP ( $X_1$ )	0.8957	0.0878
	人口密度( $X_2$ )	0.9560	0.0370
	城镇化率( $X_3$ )	0.8136	0.1569
	万元工业产值污水排放量( $X_4$ )	0.9517	0.0407
压力(P)	有效灌溉面积占播种比( $X_5$ )	0.9065	0.0787
	人均日生活用水量( $X_6$ )	0.9260	0.0623
状态(S)	降水量( $X_7$ )	0.8602	0.1177
	居民生活用水占供水比( $X_8$ )	0.8200	0.1470
影响(I)	供水综合生产能力( $X_9$ )	0.8655	0.1133
	建成区绿地率( $X_{10}$ )	0.8821	0.0992
响应(R)	城市污水综合处理率( $X_{11}$ )	0.9296	0.0593

表 4 西安市时间维度上的水资源脆弱性模糊综合评价结果

年度	评价得分	评价等级
2007	0.5993	中度脆弱
2008	0.4960	轻度脆弱
2009	0.5995	中度脆弱
2010	0.4502	轻度脆弱
2011	0.5457	中度脆弱
2012	0.3588	轻度脆弱
2013	0.2928	不脆弱
2014	0.4220	轻度脆弱
2015	0.3888	轻度脆弱
2016	0.4346	轻度脆弱
2017	0.5192	中度脆弱

4.1.3 时间维度上的评价结果分析 结合西安市水资源现状,基于 DPSIR 概念模型选取了 11 项评价指标,利用熵权法对各项指标的权重值进行了计算,得到了各项指标的熵值和权重值(见表 3),由表 3 作指标权重柱状图(见图 2)。由图 2 可知,城镇化率( $X_3$ )、居民生活用水占供水比( $X_8$ )、降水量( $X_7$ )、供水综合生产能力( $X_9$ )4 项指标所占权重最高,依次为 0.1569、0.1470、0.1177、0.1133。由此可以说明,2007 - 2017 年间,城镇化进程的加快是导致西安市水资源系统产生脆弱性的最重要因素;居民生活用水占供水比表征居民日常生活对水的需求量,这是影响水资源系统脆弱性的重要因素;反映降水资源丰沛程度的降水量这一因素也是影响西安市时间维度上水资源脆弱性大小的关键因素。

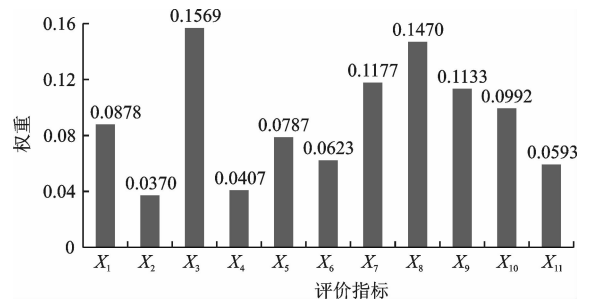


图 2 西安市时间维度上的水资源脆弱性评价指标所占权重

运用模糊数学综合评价方法,利用基于熵权法求出的权向量  $W$  和标准化矩阵  $R$ ,结合分级标准(表 2)得到了西安市 2007 - 2017 年时间维度上的水资源脆弱性综合评价结果(见图 3)。由图 3 可得:2007、2009、2011、2017 年的综合评价得分分别为 0.5993、0.5995、0.5457、0.5192,脆弱性等级均为中度脆弱;2008、2010、2012、2014、2015、2016 年的综合评价结果分别为 0.4960、0.4502、0.3588、0.4220、0.3888、0.4346,其脆弱性等级为轻度脆弱;2013 年

得分最优,为0.2928,为不脆弱等级。

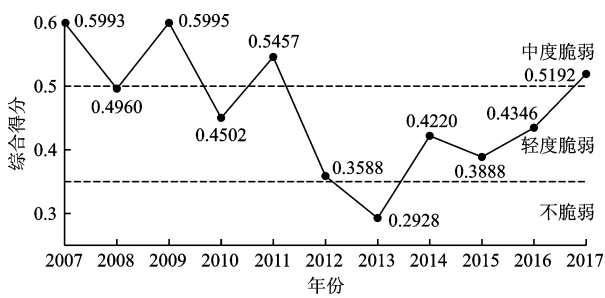


图3 西安市时间维度上的水资源脆弱性综合评价结果图

图3反映了西安市2007-2017各年度水资源脆弱性综合得分变化,从整体上呈现出水资源脆弱性的变化趋势。由图3可以看出,西安市水资源脆弱性2007-2017综合评价得分整体上呈现先下降后升高的趋势,2007-2013年间下降趋势较为明显,得分由2007年的0.5993显著下降至2013年的0.2928,脆弱性由中度脆弱降低为不脆弱;2013-2017年间综合评价得分出现上升趋势,由0.2928上升至2017年的0.5192,脆弱性由不脆弱上升为中度脆弱,但总体上呈现下降趋势。综合各项评价指标以及西安市水资源相关政策进行分析如下,自2007年以来,西安市万元工业产值污水排放量不断减少,由2007年的 $15.67\text{ m}^3$ 下降至2017年的 $10.21\text{ m}^3$ ;供水综合生产能力持续提高,由 $180.7\text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $206.5\text{ m}^3/\text{d}$ ,这主要是由于近年来西安市供水水源地供水充沛,水质优良,其中最主要的供水来自黑河水源地,由秦岭流出,地下水埋深大,其水质达标率常年为100%,是西安市最良好的供水保障;城市污水综合治理能力也不断提升,污水处理厂个数由2007年底的4座增加至2017年底的37座,

城市污水综合处理率由61.52%显著上升至93.10%。因此,西安市水资源脆弱性总体上呈下降趋势主要是由于城市综合供水以及污水处理能力的提高,引起西安市供水水质提高、水量增大,水生态持续改善,水资源系统抵抗外部负面影响的能力不断上升。但自2014年以来,西安市水资源脆弱性呈现明显上升趋势,这与近年来西安市经济水平的快速发展,人口的大量增加有密切关系。西安市常住人口城镇化率由2007年的66.10%上升至2017年的73.42%,常住人口数由2014年的626.44万人显著增加至2017年的706.06万人,尤其是自2017年实行人才引进政策以来,常住人口数自648.54万人增加至706.06万人,增加了8.9%,导致人口密度持续增加,水资源需求量不断攀升。并且,随着城市经济水平的快速发展,人口的大量增加,城市生活污水以及工业废物的排放量会大大增加,相应的水污染、水生态问题层出不穷,这些都是造成水资源脆弱性上升的重要因素。对此,西安市应加快水资源先进技术开发,加大水资源优化配置投入力度,构建集约节约的水资源利用体系促进水资源循环利用,防止水资源脆弱性进一步升高。

## 4.2 西安市空间维度上的水资源脆弱性评价

4.2.1 空间维度上的各指标权重的计算 按照西安市最新行政区划,结合资料的易获性以及水资源现状,将西安市在空间维度上划分为市区(包括新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区、雁塔区、阎良区、临潼区、长安区以及高陵区)、蓝田县、周至县、鄠邑区4大区域,即基于4个区域2011-2017年的各项数据,以此4个区域为研究对象分别基于熵权法求出各年度的各项指标所占的权重(见表5)。

表5 西安市空间维度上的水资源脆弱性评价指标所占权重

年份	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$
2011	0.0582	0.0577	0.0576	0.0584	0.0727	0.0573	0.0614	0.0582	0.2521	0.1321	0.1343
2012	0.0556	0.0553	0.0560	0.0551	0.0658	0.0587	0.978	0.0588	0.2514	0.1226	0.1229
2013	0.0472	0.0469	0.0477	0.0944	0.0524	0.0527	0.1584	0.0468	0.2042	0.0491	0.2002
2014	0.0508	0.0505	0.0511	0.0912	0.0544	0.0914	0.0505	0.0602	0.2299	0.0540	0.2159
2015	0.0502	0.0503	0.0507	0.0500	0.0539	0.1140	0.0670	0.0593	0.2192	0.0547	0.2308
2016	0.0513	0.0514	0.0519	0.0931	0.0553	0.0917	0.0663	0.0614	0.2249	0.0542	0.1984
2017	0.0556	0.0556	0.0557	0.0650	0.0616	0.0797	0.0567	0.0571	0.2489	0.0592	0.2049

### 4.2.2 空间维度上的水资源脆弱性综合评价结果

利用表5中各年度的指标权重 $W_i$ 分别与本年度的标准化矩阵 $R_i$ 按公式(8)进行计算得到本年度空

间维度上的各分区的模糊综合评价得分,2011-2017各年度的空间维度上的模糊评价得分如表6所示。

表 6 西安市空间维度上的水资源脆弱性评价得分

年份	蓝田县	周至县	鄠邑区	市区
2011	0.3805	0.3692	0.5670	0.6445
2012	0.4305	0.2844	0.5609	0.6241
2013	0.3593	0.2378	0.4715	0.5466
2014	0.4475	0.2792	0.3423	0.6075
2015	0.4281	0.3287	0.3820	0.5753
2016	0.3812	0.3447	0.4538	0.5647
2017	0.4048	0.3799	0.4080	0.6024

4.2.3 空间维度上的评价结果分析 空间维度上的西安市水资源脆弱性评价利用年度各项资料数据,基于 DPSIR 模型选取 11 个评价指标,利用熵权法求取各个指标所占权重,最后采用模糊数学评价方法对各分区进行综合评价评分。通过观察各年度空间维度上的指标权重(表 5)。不难发现,空间维度上的指标权重与时间维度上的相比各指标所占权重的大小差异更加明显。以 2017 年为例,与时间维度上的权重占比不同,供水综合生产能力( $X_9$ )和城市污水综合处理率( $X_{11}$ )是影响上述 4 个区域水资源脆弱性的最重要的两个因素,其余指标权重分布更加均匀,集中在 0.06 左右。从各项指标的年际变化角度来看,城市污水综合处理率( $X_{11}$ )在西安市空间维度上的水资源脆弱性评价中所占比重自 2011 年起明显增大,这说明城市污水综合处理能力在对西安市空间维度上的水资源脆弱性的影响中扮演着日益重要的角色。

将表 6 的各年度空间维度上的水资源脆弱性评价得分与时间维度上的全市 2011 - 2017 的综合评价得分进行比较,如图 4。

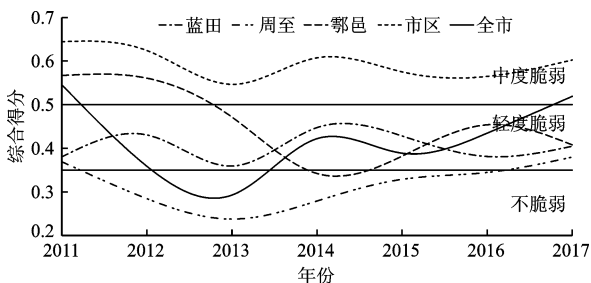


图 4 2011 - 2017 西安市各区域水资源脆弱性评价得分曲线

根据图 4 对各区域水资源脆弱性的年际变化进行分析,结果显示市区和鄠邑区的水资源脆弱性综合评价得分自 2011 年有明显的降低趋势,其中鄠邑区的综合评价得分由 2011 年的 0.5670 降至 2017 年的 0.4080,评价等级由中度脆弱下降到轻度脆

弱,下降趋势最为显著。这说明市区和鄠邑区的水资源脆弱性近年来呈下降的趋势,水资源可持续发展潜力大。蓝田县水资源脆弱性年际变化最为稳定,研究时段内维持在轻度脆弱水平;周至县、鄠邑区、市区的水资源脆弱性 2011 - 2013 年均呈下降趋势,2013 - 2017 均呈上升趋势,与时间维度上的变化趋势一致。

以 2017 年为例对各区域水资源脆弱性评价结果进行分析。由评价结果可知,西安市各区域水资源脆弱性有明显的差异。对 2017 年空间维度上的西安市水资源评价结果进行排名依次为:周至县、蓝田县、鄠邑区、市区,处于轻度脆弱级别的周至县是水资源脆弱性最低的地区,而处于中度脆弱的市区是脆弱性最高的地区。综合各方面因素进行分析,发现市区与周边区县相比各方面存在着较大差异。例如市区 2017 年常住人口为  $580.29 \times 10^4$  人,城镇化率高达 88.4%,人口密度远远大于其他区县,因此水资源需求量远超其他区县;市区经济发展水平高,是全市主要工业企业的驻地,生活污水及工业废水排放量大,水环境问题严重,2017 年万元工业产值污水排放量高达  $10.79 \text{ m}^3$ ,相比之下,鄠邑区的万元工业产值污水排放量仅为  $3.11 \text{ m}^3$ ;目前西安市市区配套供水管网存在不同程度的老化,水资源配置较低,这些均是造成市区水资源脆弱性高于其他地区的主要因素。对此,西安市各级政府应根据空间差异因地制宜,协调经济发展与水资源之间的关系,提高城市水资源利用率,降低水资源脆弱性。

综合时间维度与空间维度上的水资源评价结果,西安市各区县水资源脆弱性年际变化整体上一致,均呈现先下降后上升的趋势,尤其是近两年均呈现出上升趋势,空间异质性明显,各区县水资源可持续发展潜力大,因此西安市应进一步优化水资源配置,提升水资源开发与利用的合理性,这是改善水资源系统脆弱性的关键,也是进一步推进大西安国家中心城市、国际大都市建设的持续生态驱动力。

## 5 结论

(1) 时间维度上的西安市水资源脆弱性评价结果显示:西安市 2007 - 2017 水资源脆弱性整体上呈现先下降后上升的趋势,2007 - 2013 明显下降,2013 - 2017 升高,除 2013 年为不脆弱状态外,其余年份均为轻度或中度脆弱。经济社会快速发展和人口持续增多导致的水资源需求量的增大是西安市水



资源脆弱性的最主要原因。

(2)2017年西安市水资源脆弱性按地区由高到底依次为:市区、鄠邑区、蓝田县、周至县。市区与周边地区之间评价结果存在明显差异,市区水资源脆弱性明显高于其他区县,供水综合生产能力和城市污水综合处理率是影响西安市不同区县水资源脆弱性差异的最重要的两个因素,各级地方政府须根据空间差异因地制宜,尽快提出降低脆弱性的适应性政策。

(3)综合时间维度与空间维度上的水资源评价结果,西安市水资源可持续发展潜力大,进一步优化水资源配置,提高水资源利用率,缓解供需矛盾是降低水资源脆弱性的关键,是未来实现“大西安生态发展梦想”的强大驱动力。

### 参考文献:

- [1] 徐剑桥. 城市污水资源化与水资源循环利用的思考与探索[J]. 中国资源综合利用, 2018,36(11):79-81.
- [2] 曾红春,杨奇勇,李文军,等. 湖南省相对水资源承载力时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):69-74+79.
- [3] 辛红青. 浅析水资源管理及合理利用[J]. 黑龙江科技信息,2013(15):93.
- [4] 徐学良. 城市水资源利用及其用水需求预测[J]. 中国资源综合利用,2017,35(8):50-51+57.
- [5] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):104-108.
- [6] 韩文艳,陈兴鹏,张子龙,等. 中国地级及以上城市水资源利用效率的时空格局分析[J]. 水土保持研究,2018,25(2):354-360.
- [7] 朱怡娟. 武汉市水资源脆弱性评价研究[D]. 武汉:华中师范大学,2015.
- [8] 职璐爽,薛惠锋. 基于熵权法的城市水资源脆弱性研究——以广东省为例[J]. 水土保持通报,2018,38(5):328-335.
- [9] 邹君,郑文武,杨玉蓉. 基于GIS/RS的南方丘陵区农村水资源系统脆弱性评价——以衡阳盆地为例[J]. 地理科学,2014,34(8):1010-1017.
- [10] 王钰,胡宝清. 基于GIS的广西西江流域脆弱性评价及综合整治研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(9):48-53.
- [11] 夏军,石卫,陈俊旭,等. 变化环境下水资源脆弱性及其适应性调控研究——以海河流域为例[J]. 水利水电技术,2015,46(6):27-33.
- [12] 胡蓓琳,潘争伟,金菊良,等. 基于集对分析模型的巢湖流域水资源系统脆弱性评价[J]. 水电能源科学,2013,31(10):21-24.
- [13] CHANG H, JUNG I W, STRECKER A, et al. Water supply, demand, and quality indicators for assessing the spatial distribution of water resource vulnerability in the Columbia River Basin [J]. Atmosphere - Ocean, 2013, 51(4): 339-356.
- [14] SANCHEZ - TORRES E G, OSPINA - NOREÑA J E, GAY - GARCÍA C, et al. Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo - Tamesí river basin, Tamaulipas, México [J]. Atmósfera, 2011, 24(1): 141-155.
- [15] PERVEEN S, JAMES L A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross - scale comparisons of water resources vulnerability [J]. Applied Geography, 2010, 31(1): 321-328.
- [16] 王海科,李亚斌,钱会. 西安市可利用降水量特征分析及预测[J]. 灌溉排水学报,2017,36(12):118-122.
- [17] 邹君,杨玉蓉,谢小立. 地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报,2007(2):132-135+145.
- [18] 曹琦,陈兴鹏,师满江. 基于DPSIR概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学,2012,34(8):1591-1599.
- [19] 李智飞,门宝辉,张士锋,等. 河西走廊地区狭义/广义水资源脆弱性对比研究[J]. 干旱区地理,2014,37(5):939-947.
- [20] 崔东文. 基于改进BP神经网络模型的云南文山州水资源脆弱性综合评价[J]. 长江科学院院报,2013,30(3):1-7.
- [21] 张旭. 基于熵权法的模糊集对分析模型在辽阳市水资源脆弱性评价中的应用[J]. 黑龙江水利科技,2018,46(9):167-171.
- [22] 朱玲燕,苏维词. 基于熵权法及灰色关联模型的水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):233-236.
- [23] 王海科,徐盼盼,钱会. 关中地区干旱等级模糊综合评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):43-47+54.