

# 宝鸡市水资源脆弱性评价

任源鑫<sup>1</sup>, 张海宁<sup>1</sup>, 周旗<sup>1</sup>, 张星星<sup>1,2</sup>

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013; 2. 陕西省宝鸡市八鱼镇人民政府, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:** 以宝鸡市为研究区域, 针对复杂的人水关系, 对1999-2015年间水资源脆弱性进行整体评价, 并预估未来趋势, 找到影响宝鸡市水资源脆弱性的主导因子, 为降低水资源脆弱性提供合理的解决方案。以DPSIR模型为基础, 选取19个能够反映出宝鸡市水资源脆弱性的指标, 依靠层次分析法与熵值法主客观组合赋权的优势, 结合模糊综合评价法对各项指标进行综合得分, 借助S型曲线对水资源脆弱性与指标综合得分之间建立非线性函数关系, 由此对17年间水资源脆弱性进行等级划分。结果表明: 宝鸡市水资源整体呈严重脆弱(IV级), 但整体及未来下降趋势明显, 降水与工业重复用水率为其主导因子, 改善水资源管理模式是水资源脆弱性下降的重要举措。

**关键词:** 水资源脆弱性; DPSIR模型; 层次分析法; 熵值法; 模糊综合评价; S型曲线; 宝鸡市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0119-08

## Evaluation on water resources vulnerability of Baoji City

REN Yuanxin<sup>1</sup>, ZHANG Haining<sup>1</sup>, ZHOU Qi<sup>1</sup>, ZHANG Xingxing<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China;

2. People's Government of Bayu Town, Baoji City, Shaanxi Province, Baoji 721013, China)

**Abstract:** Taking Baoji city as the research area and aiming at understanding the complexity of the human-water relationship in Baoji, this paper made a comprehensive evaluation of the water resource vulnerability from 1999 to 2015, predicted the future development trend, and found out the leading factors affecting the water resource vulnerability in baoji, so as to reduce the water resource vulnerability ability to provide reasonable solutions. Based on the DPSIR model, 19 indicators were chosen to reflect the brittleness of water resources in baoji. Relying on the advantages of combination of subjective and objective weighting by analytic hierarchy process (AHP) and entropy method, and combining with fuzzy comprehensive evaluation method, the comprehensive scores of various indicators were obtained. Using the S-type curve, the non-linear function relationship between water resource vulnerability and index comprehensive score was established, and the water resource vulnerability in the past 17 years was classified. The results showed that water resources in baoji city were in a weak position (level 4) overall, but the overall trend and future decline trend were obvious. Precipitation and industrial reuse water rate are the main factors; therefore, improving water resource management model is an important measure to reduce water resource vulnerability.

**Key words:** water resource vulnerability; DPSIR model; analytic hierarchy process; entropy method; fuzzy comprehensive evaluation; S-type curve; Baoji City

## 1 研究背景

地球水资源系统受内、外因素的共同扰动作用,

其不仅表现为水资源系统固有的属性, 还表现为一种人水关系, 即水资源系统供需关系不能满足人类社会或生态需求时, 人类社会或生态体系正常

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2018-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771215); 陕西省科技统筹计划项目(2016KTCL03-17); 陕西省社会科学基金项目(2016G013)

作者简介: 任源鑫(1995-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为气候变化与资源环境。

通讯作者: 周旗(1963-), 男, 重庆人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地理学与环境科学研究。

功能难以发挥或受限的可能性<sup>[1-2]</sup>。当今世界格局下,水资源问题已经成为影响全球经济发展最严重的问题<sup>[3]</sup>。

水资源脆弱性研究起源于1968年法国 Albineth 和 Margat 的地下水脆弱性研究,研究中将地下水脆弱性理解为人类所涉及水层的天然特性<sup>[4]</sup>。我国有关水资源脆弱性的研究相对较晚,但发展较快,如2013年雒新萍等<sup>[5]</sup>针对中国的8个流域做出了整体的脆弱性评价。对于水资源脆弱性的研究,国内外学者均倾向于采用不同的方法对于水资源进行定量评价<sup>[6]</sup>。基于熵权法等传统赋权方法仍是目前的主流趋势<sup>[7-10]</sup>,GIS与神经网络的方法也多被应用于水资源脆弱性评价当中<sup>[11-14]</sup>,姜海波等<sup>[15]</sup>通过水质与水量的相关指标评价了塔里木河流域水资源脆弱性相关趋势,但这些方法均具有一定的客观性,且受指标标准值范围的影响,缺乏主观因素的评价。模糊综合评价法是一种能够将定性定量、主观与客观相结合的综合评价方法<sup>[16-19]</sup>。本文以宝鸡市为研究区域,针对水资源系统的复杂性<sup>[20]</sup>,基于DPSIR模型,构建出水资源脆弱性评价指标体

系,通过层次分析法与改进的熵值法对各项指标进行主客观组合赋权,结合模糊综合评价法对宝鸡市17年水资源脆弱性进行综合得分,将能够反映脆弱性机理的S型曲线应用于脆弱性分级当中<sup>[21]</sup>,根据因子贡献率找出主导影响因子,为宝鸡市水资源脆弱性现状评价及改善水资源脆弱性提供现实支持。

## 2 研究区概况

宝鸡,古称陈仓,总面积约1 8131 km<sup>2</sup>,是陕西省第二大城市,自古有“关中水龙头”的美称。全市位于秦岭以北的黄河流域面积13 027 km<sup>2</sup>,占全市总流域面积的72%,分布有黄河的一级支流渭河,自西向东横贯全境,流程200.02 km;位于秦岭以南的长江流域面积为5 104 km<sup>2</sup>,占全市总流域面积的28%。

宝鸡市年平均降水量在600~900 mm之间,受地理位置、气候特征和下垫面条件的影响,年内分布不均,变化较大,降水空间分布不平衡,山区、平原差异悬殊,产流深高值区在秦岭山区一带,有东低西高、北低南高的特点。

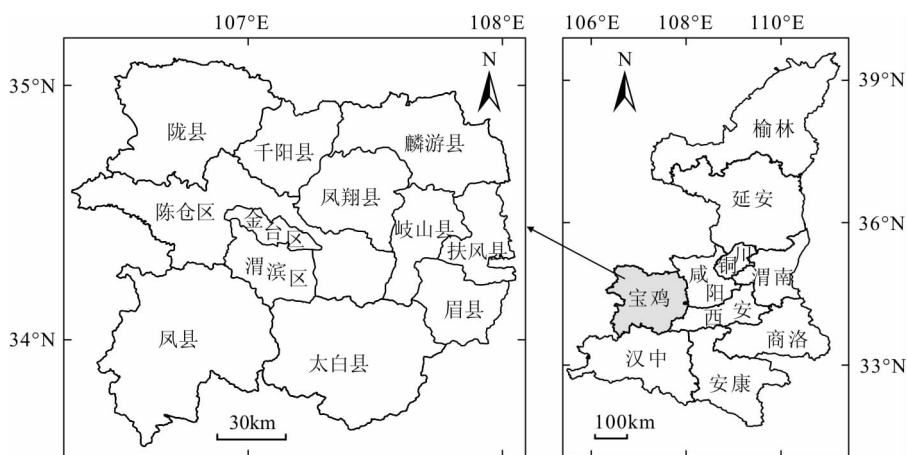


图1 宝鸡地区地理位置及行政区划图

## 3 研究内容与方法

本文通过宝鸡市水资源脆弱性评价指标体系的构建、评价指标体系内权重的确定以及模糊综合评价法对宝鸡市1999-2015年水资源系统的脆弱性进行综合评价,通过计算各指标的贡献率进一步分析影响水资源脆弱性的主要因素。由综合得分对宝鸡市水资源脆弱情况进行整体分析,并由此得出宝鸡市1999-2015年水资源脆弱性动态变化趋势。

### 3.1 模型指标体系构建

3.1.1 DPSIR模型的含义 DPSIR概念模型,即“驱动力(Driving forces)-压力(Pressure)-状态(State)-影响(Impact)-响应(Responses)”模型。该模型描述起源和结果之间的环境问题逻辑链,从系统的角度看待人与环境系统之间的相互作用,涵盖了区域经济、人口、资源、社会发展与生态环境5大要素,较好地体现了人与资源环境之间的因果关系及各子系统之间的内在联系。

3.1.2 DPSIR 模型理论框架 本文根据 DPSIR 模型,共选取 19 个指标构建宝鸡市水资源脆弱性评价指标体系,如图 2 所示。划分情况、指标含义及数据来源见表 1,其中数据来源主要为《宝鸡统计年鉴》<sup>[22]</sup>、《宝鸡市水资源公报》<sup>[23]</sup>等。

针对不同指标对水资源脆弱性评价的响应关系,将指标分为正负反向两类指标。正向指标数值与水资源脆弱性成正比,即同向变化的指标为正向指标;负向指标与水资源脆弱性成反比,即反向变化的指标为负向指标。

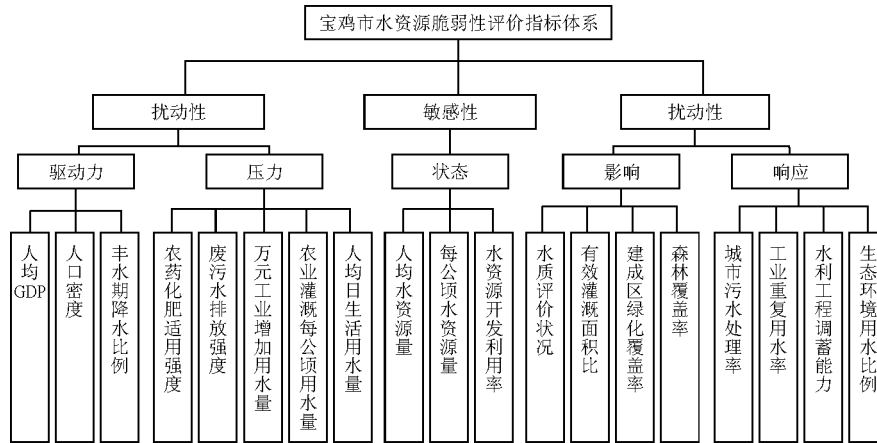


图 2 宝鸡市水资源脆弱性评价指标体系

3.2 确定各评价指标的权重

各指标权重的确定直接影响到水资源脆弱性的准确程度。确定指标权重既要遵循客观规律,又应与实际意义相结合。在已有的研究中,共有 3 种赋权方法:主观赋权法、客观赋权法、组合赋权法。为了克服单一方法存在的局限性,本文分别采用层次分析法和改进的熵值法相结合的主观 + 客观的组合赋权方法来计算各指标权重<sup>[24]</sup>。

3.2.1 层次分析法 (APH 法) 经过专家咨询,本文共建立 6 个判断矩阵:准则因素判别矩阵、驱动力因素判断矩阵、压力因素判断矩阵、状态因素判断矩阵、影响因素判断矩阵、响应因素判断矩阵。为避免专家的个人偏好对评判结果的影响,共邀请 10 位专家进行打分。依据宝鸡市水资源脆弱性评价指标体系,通过构建的判断矩阵,对各层级指标两两比较,确定相对重要性,并采用 Thom as L. satty 标度法,对指标进行赋值,均通过公式进行一致性检验。经 10 位专家进行打分后,综合权重取 10 位专家打分的均值,结果如表 2 所示。

3.2.2 改进的熵值法 熵最早是物理学中的概念,在社会系统中,信息熵主要用于测量系统的不确定性,信息熵越高,系统结构越平衡,差异较小,变化慢<sup>[25]</sup>;反之,则差异大,变化快。因此得出各指标的权重<sup>[26]</sup>,如表 3 所示。

3.2.3 组合赋权法 客观 + 主观赋权法与单一赋权方法相比,计算结果的可信度更高,权重值的科学

性更强。根据公式(1)得出各指标的组合权重,即综合权重,见表 4。

$$A_i = \lambda A_{1i} + (1 - \lambda) A_{2i} \tag{1}$$

式中:  $A_i$  为权重值;  $A_{1i}$  为层次分析法得到的权重值;  $A_{2i}$  为改进的熵值法得到的权重值;本文采用主客观相结合的方法进行组合权重的计算,因此根据实际情况,对于主客观方法的计算进行等权赋值,由此将  $\lambda$  赋予 0.5<sup>[10]</sup>。

3.3 模糊综合评价法

本文所选取的 19 项指标中,正向指标包括:人口密度、丰水期降水比例、农药化肥使用强度、废污水排放强度、万元工业增加值用水量、农业灌溉每公顷用水量、人均日生活用水量;负向指标包括:人均 GDP、人均水资源量、每公顷水资源量、水资源开发利用率、水质评价状况、有效灌溉面积比、建成区绿化覆盖率、森林覆盖率、城市污水处理率、工业重复用水量、水利工程调蓄能力、生态环境用水比例。其中,正向指标通过公式(2),负向指标通过公式(3)进行计算。

最大优越性:

$$r_{jk} = (X_{jk} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{2}$$

最小优越性:

$$r_{jk} = (X_{\max} - X_{jk}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{3}$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, 17; j = 1, 2, \dots, 19$ 。  $X_{\max}$  为第  $j$  项指标的最大值;  $X_{\min}$  为第  $j$  项指标的最小值。由此可得模糊关系矩阵  $R$ 。

表1 宝鸡市水资源脆弱性评价指标含义及数据来源

评价指标	指标含义	正负指标	数据来源或计算方法
驱动力 (D)	人均GDP/元	区域经济发展状况 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市统计年鉴
	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	单位面积人口数 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 宝鸡市统计年鉴
	丰水期降水比重/%	丰水期占全年降水量的比例 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 宝鸡市水资源管理处
	农药化肥使用强度/ (t·10 <sup>-3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	单位农作物播种面积农药化肥施用量 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 药肥施用量/耕种面积
	废污水排放强度/ (t·10 <sup>-3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	单位土地面积废污水排放量 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 废污水排放量/土地面积
压力 (P)	万元工业增加值用水量/m <sup>3</sup>	工业生产耗水资源量 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 宝鸡市水资源公报
	农业灌溉每公顷用水量/m <sup>3</sup>	农作物每公顷灌溉用水量 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 宝鸡市水资源公报
	人均日生活用水量/L	人均每日生活用水量 该值越大,水资源脆弱性越大。	正向 指标 宝鸡市水资源公报
状态 (S)	人均水资源量/m <sup>3</sup>	人均拥有水资源量 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市水资源公报
	每公顷水资源量/m <sup>3</sup>	每公顷土地拥有水资源量 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市水资源公报
	水资源开发利用率/%	水资源利用程度 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 用水总量/水资源总量
	水质评价状况	Ⅲ类以上水质标准的河流比例 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 Ⅲ类以上水质标准的河流/河流总数
影响 (I)	有效灌溉面积比/%	农作物有效灌溉程度 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 有效灌溉面积/农作物播种面积
	建成区绿化覆盖率/%	建成区植被覆盖情况 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市统计年鉴
	森林覆盖率/%	森林、植被覆盖情况 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市统计年鉴
响应 (R)	城市污水处理率/%	生活污水集中处理情况 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市水资源公报
	工业重复用水率/%	工业生产用水重复利用程度 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 宝鸡市水资源公报
	水利工程调蓄能力/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	区域内水利工程的调蓄能力 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 供水量/土地面积
	生态环境用水比例/%	生态环境用水量所占比例 该值越大,水资源脆弱性越小。	负向 指标 生态用水量/总用水量

表 2 宝鸡市水资源脆弱性评价体系主观权重结果

指标	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$S_1$	$S_2$
$A_{1i}$	0.0921	0.0897	0.1026	0.0260	0.0071	0.0159	0.0174	0.0141	0.0154	0.0489
指标	$S_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
$A_{1i}$	0.0443	0.0286	0.0861	0.0994	0.0464	0.0604	0.0930	0.0501	0.0623	

表 3 宝鸡市水资源脆弱性评价指标的熵权

指标	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$S_1$	$S_2$
$A_i$	0.0534	0.0547	0.0525	0.0592	0.0527	0.0517	0.0527	0.0515	0.0520	0.0512
指标	$S_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
$A_i$	0.0511	0.0481	0.0517	0.0531	0.0535	0.0550	0.0568	0.0504	0.0488	

表 4 宝鸡市水资源脆弱性评价指标综合权重值

指标	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$S_1$	$S_2$
$A_{1i}$	0.0921	0.0897	0.1026	0.0260	0.0071	0.0159	0.0174	0.0141	0.0154	0.0489
$A_{2i}$	0.0534	0.0547	0.0525	0.0592	0.0527	0.0517	0.0527	0.0515	0.0520	0.0512
$A_i$	0.0728	0.0722	0.0776	0.0426	0.0299	0.0338	0.0351	0.0328	0.0337	0.0501
指标	$S_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
$A_{1i}$	0.0443	0.0286	0.0861	0.0994	0.0464	0.0604	0.0930	0.0501	0.0623	
$A_{2i}$	0.0511	0.0481	0.0517	0.0531	0.0535	0.0550	0.0568	0.0504	0.0488	
$A_i$	0.0477	0.0383	0.0689	0.0763	0.0499	0.0577	0.0749	0.0503	0.0555	

$$R = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0154 & 0.0311 & 0.0490 & 0.0720 & 0.1128 & 0.1481 & 0.1943 & 0.2485 & 0.3342 & 0.0369 & 0.5025 & 0.6265 & 0.7491 & 0.8542 & 0.9126 & 1.0000 \\ 0.9946 & 0.9008 & 0.4776 & 0.2315 & 0.1738 & 0.1942 & 0.1638 & 0.0696 & 0.0770 & 0.9050 & 1.0000 & 0.1515 & 0.1572 & 0.1158 & 0.0814 & 0.0440 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.6599 & 0.0986 & 0.9328 & 0.1262 & 0.2326 & 0.2288 & 0.2848 & 0.2902 & 0.3839 & 0.3546 & 0.1619 & 0.0000 & 0.0153 & 0.3465 & 0.2759 & 0.9551 \\ 0.3540 & 0.3660 & 0.2902 & 0.2911 & 0.0000 & 0.2330 & 0.2405 & 0.2534 & 0.0156 & 0.0823 & 1.0000 & 0.9938 & 0.9817 & 0.9733 & 0.9714 & 0.9717 & 0.9736 \\ 0.8177 & 0.8217 & 0.8585 & 0.8588 & 0.6041 & 0.7177 & 0.7077 & 0.6796 & 0.6644 & 0.4269 & 0.0000 & 0.2200 & 0.9733 & 0.8966 & 1.0000 & 0.9878 & 0.9026 \\ 0.0000 & 0.7993 & 0.8101 & 0.8233 & 0.7930 & 0.8340 & 0.8698 & 0.9326 & 0.9568 & 0.9664 & 0.9772 & 0.9882 & 0.9942 & 0.9992 & 1.0000 & 1.0000 & 0.9983 \\ 0.0864 & 0.0864 & 0.1889 & 0.7148 & 0.9753 & 0.6864 & 1.0000 & 0.2222 & 0.6420 & 0.0370 & 0.2346 & 0.2716 & 0.4938 & 0.0000 & 0.1111 & 0.0864 & 0.2840 \\ 0.8781 & 0.8267 & 0.0000 & 0.1175 & 0.3391 & 0.4319 & 0.3457 & 0.3568 & 0.8019 & 0.6127 & 0.8854 & 0.8165 & 0.9789 & 1.0000 & 0.7386 & 0.7160 & 0.5498 \\ 0.7437 & 0.6537 & 0.2532 & 0.1062 & 1.0000 & 0.2404 & 0.7784 & 0.4978 & 0.4918 & 0.2693 & 0.4745 & 0.6147 & 0.0000 & 0.0346 & 0.0268 & 0.0173 & 0.0307 \\ 0.7362 & 0.6346 & 0.1700 & 0.0000 & 1.0000 & 0.1215 & 0.7671 & 0.6077 & 0.5719 & 0.2731 & 0.5614 & 0.7735 & 0.6854 & 0.4023 & 0.0850 & 0.5000 & 0.5607 \\ 0.1889 & 0.2475 & 1.0000 & 0.9037 & 0.0000 & 0.5150 & 0.0871 & 0.6064 & 0.3679 & 0.6337 & 0.3935 & 0.3017 & 0.1178 & 0.4452 & 0.5654 & 0.6777 & 0.6917 \\ 0.6000 & 0.4444 & 0.5385 & 0.6429 & 0.5000 & 0.3571 & 0.4286 & 0.4000 & 1.0000 & 0.4000 & 0.3333 & 0.4286 & 0.5000 & 0.5833 & 0.6667 & 0.0000 & 0.3750 \\ 0.0652 & 0.0000 & 0.1387 & 0.5281 & 0.3128 & 0.3209 & 0.1893 & 0.0361 & 0.6436 & 0.4359 & 0.4470 & 0.5952 & 0.9204 & 1.0000 & 0.5250 & 0.6645 & 0.7068 \\ 0.0262 & 0.0000 & 0.1137 & 0.4829 & 0.5249 & 0.5249 & 0.6295 & 0.6343 & 0.7393 & 1.0000 & 0.8666 & 0.8062 & 0.8075 & 0.9458 & 0.7257 & 0.7349 & 0.7485 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1774 & 0.2255 & 0.2446 & 0.3933 & 0.3402 & 0.4278 & 0.6598 & 0.5432 & 0.4904 & 0.4916 & 0.5237 & 0.9434 & 0.9434 & 0.9434 & 1.0000 \\ 0.0556 & 0.0000 & 0.1027 & 0.1999 & 0.2971 & 0.4138 & 0.4142 & 0.4929 & 0.5888 & 0.6879 & 0.7902 & 0.8098 & 0.8343 & 0.9465 & 0.9170 & 1.0000 & 0.9271 \\ 0.0000 & 0.0347 & 0.0618 & 0.0713 & 0.0773 & 0.0536 & 0.1104 & 0.2871 & 0.2934 & 0.1798 & 0.7035 & 0.7539 & 0.9811 & 1.0000 & 0.8454 & 0.8738 & 0.8927 \\ 0.0829 & 0.0841 & 0.0851 & 0.0826 & 0.0074 & 0.0000 & 0.0004 & 0.1357 & 0.0106 & 0.6495 & 0.6399 & 1.0000 & 0.5549 & 0.1277 & 0.1584 & 0.3961 & 0.2414 \\ 0.0000 & 0.0023 & 0.0115 & 0.0138 & 0.0203 & 0.0253 & 0.0345 & 0.0368 & 1.0000 & 0.2218 & 0.2552 & 0.2989 & 0.1195 & 0.3207 & 0.3333 & 0.3563 & 0.3908 \end{pmatrix}$$

根据表 4 确定评价因素的模糊权向量矩阵 A:

$$A = (0.0728, 0.0722, 0.0776, 0.0426, 0.0299, 0.0338, 0.0351, 0.0328, 0.0337, 0.0501, 0.0477, 0.0383, 0.0689, 0.0763, 0.0499, 0.0577, 0.0749, 0.0503, 0.0555)$$

本文采用  $M(\cdot, +)$  模糊算子模型公式(4)对  $A$  与  $R$  进行合成,此合成方法即保留了单因素的评价信息,又考虑了所有因素的影响。

$$b_j = \sum_{k=1}^{19} a_j r_{jk}, (k = 1, 2, \dots, 17) \quad (4)$$

其中,  $\sum_{j=1}^{19} a_j = 1$ 。

通过构建模糊关系矩阵进行相关矩阵运算,可得宝鸡市 1999 - 2015 年水资源脆弱性综合评价结果,如表 5 所示。

表 5 宝鸡市 1999 - 2015 年水资源脆弱性综合评价结果

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
综合得分	0.6963	0.7172	0.7228	0.6099	0.6730	0.6940	0.6450	0.6448	0.5252
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
综合得分	0.5178	0.4426	0.4547	0.4541	0.4271	0.4485	0.4222	0.3398	

### 4 结果与分析

鉴于水资源脆弱性与指标间的复杂关系,借助 S 型曲线对水资源脆弱性与指标综合得分之间建立非线性函数关系,如公式(5)所示<sup>[21]</sup>。

$$\begin{cases} 0 & x < c \\ 2\left(\frac{x-c}{d-c}\right)^2 & c \leq x < \frac{c+d}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-d}{d-c}\right)^2 & \frac{c+d}{2} \leq x < d \\ 1 & d \leq x \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $c, d$  为根据公式(4)对模型设置的上、下限阈值,即  $c = 0, d = 1$ ;  $x$  为 S 型曲线模型自变量。

将构建好的 S 型曲线函数进行 5 类等间距划分,并对应于定义域之上。得出综合评价得分划分标准,即不脆弱( I 级),轻度脆弱( II 级),中等脆弱( III 级),严重脆弱( IV 级),极脆弱( V 级)得到分段标准与评价等级见表 6。

表 6 宝鸡市水资源脆弱性等级划分标准

划分标准	脆弱程度	脆弱等级
$\leq 0.32$	不脆弱	I
$0.32 \sim 0.45$	轻度脆弱	II
$0.45 \sim 0.55$	中等脆弱	III
$0.55 \sim 0.68$	严重脆弱	IV
$\geq 0.68$	极脆弱	V

根据表 5、6 绘制出宝鸡市 1999 - 2015 年水资源脆弱性综合得分值图,如图 3 所示。图 3 中 4 条横线为水资源脆弱性等级分界上限,由图 3 可知,1999 - 2015 年间宝鸡市水资源脆弱性呈整体下降趋势,且在未来继续下降的可能性较大。宝鸡市水资源脆弱性程度主要分为 3 个阶段,即 1999 - 2006

年宝鸡市水资源脆弱性整体呈严重脆弱及极脆弱性;2007 - 2008 年呈中等脆弱性;2009 - 2015 年呈轻度脆弱性。近 17 年来,宝鸡市水资源脆弱性平均综合得分为 0.555,属于严重脆弱( IV 级)。

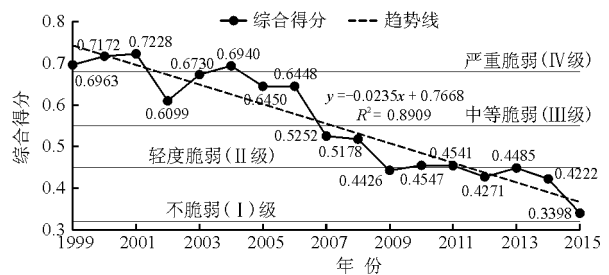


图 3 宝鸡市 1999 - 2015 年水资源脆弱性综合得分评价

通过计算各评价指标的贡献率,寻求影响宝鸡市水资源脆弱性的主要原因,找出主导因子进行分析评价。根据公式(6)计算得出指标贡献率,结果如图 4 所示。

$$r_i = \frac{WRV_i}{WRV} \quad (6)$$

式中:  $WRV_i$  为第  $i$  个评价指标的贡献度;  $WRV$  为所有指标的总贡献度;  $r_i$  为第  $i$  个评价指标对水资源脆弱性的影响程度。数值大小与脆弱性影响呈正比关系。

结合图 4(a) ~ 4(e) 分析可知,1999 - 2006 年间,响应指标中,工业重复用水率对宝鸡市水资源脆弱性的影响最大。此结果表明,在这段时间内,宝鸡市工业重复用水率处于较低水平,大量的工业用水未得到有效的循环利用,造成了宝鸡市水资源的巨大压力;其次贡献率较大的指标为万元工业增加值用水量和废污水排放量两个指标,表明这一阶段,宝鸡市工业生产对水资源的需求量较大,而生产过程中工厂所产生的有害水体对水质造成污染,从而增

加了水资源的脆弱性;1999 - 2006 年,宝鸡市总体水质比较差,水资源表现出较强的脆弱性;从人均 GDP 这一指标可以看出宝鸡市当时正处于高速发展阶段,因此,产业结构的不合理造成了该段时间水资源巨大的压力。

2007 - 2008 年宝鸡市水资源脆弱性表现为中等脆弱,这一阶段年降水量较其他年份小,属偏枯年份,因此对宝鸡市水资源脆弱性贡献率最大。人均

GDP 与工业重复用水率指标贡献率仍然较高,说明宝鸡经济发展产业结构有待转型升级。同时,为了应对宝鸡市经济快速发展与水资源日益短缺的新形势,宝鸡市 2006 年正式启动了创建节水型城市活动,大量的节水措施及工程深入各个群体当中,成果显著。并于 2008 年 9 月通过国家考核小组验收。因此这一阶段宝鸡市水资源脆弱性快速下降。

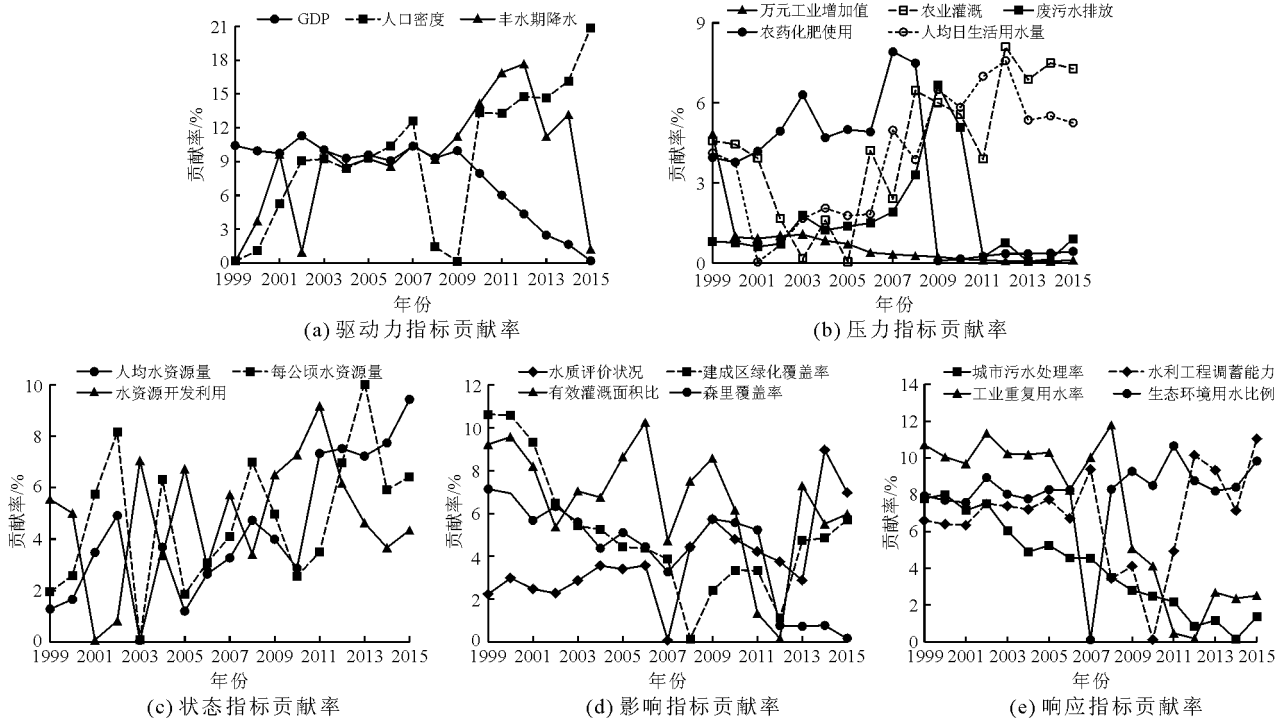


图 4 5 类因素指标贡献率

2009 - 2015 年宝鸡市水资源脆弱性表现为轻度脆弱阶段,根据指标贡献率分析可知,人口密度、丰水期降水比例、生态环境用水比例是影响宝鸡市这一阶段水资源脆弱性的主要因素。2009 年经国务院批复通过建设关中 - 天水经济区,宝鸡作为重要的节点城市,经济发展速度加快,城市人口的大量集聚加剧了水资源脆弱性。与此同时,国家针对农村及小型节水措施的改造以及宝鸡市渭河干支流水利措施的建设与加固工程,对于宝鸡市水资源脆弱性总体下降趋势起到了重要的影响作用。2015 年,宝鸡市渭河综合治理主体工程全面竣工,渭河干流内污水的全面截留已基本实现,对于宝鸡市水资源脆弱性的降低起到了至关重要的作用。

### 5 结论与建议

以 DPSIR 模型 5 个逻辑层次为基础,结合层次分析法与改进的熵值法主客观赋权优势,对宝鸡市

水资源脆弱性 19 个指标进行组合赋权,针对一些指标之间信息挖掘度不足、指标与指标间定量化界限不清等特点,本文采用模糊综合评价法进行综合得分,并在 S 型曲线函数的基础上对水资源脆弱性进行了等级划分,由此得出以下结论:

(1) 1999 - 2015 年宝鸡市水资源脆弱性等级处于严重脆弱(IV级),但 17 a 间脆弱性整体呈下降趋势,且未来继续下降可能较大。具体可分为 3 个阶段:1999 - 2006 年严重脆弱阶段;2007 - 2008 年中等脆弱阶段;2009 年 - 2015 年轻度脆弱阶段。

(2) 根据宝鸡市各指标因素的贡献率可以看出,自然因素与人为因素共同影响着宝鸡市水资源脆弱性级别。其中,降水量、工业重复用水率、万元工业增加值用水量、废污水排放量、人口密度、生态环境用水量为其主导因子。国家良好的水资源利用及管理政策能够在很大程度上对水资源脆弱性起到降低的作用。

(3)根据水资源脆弱性评价结果及主导影响因素来看,提高水资源利用率、加大生态用水投入、整治废水排放是降低水资源脆弱性的重要举措,积极优化水资源管理模式将有助于实现水资源合理配置及水资源脆弱性的整体改善。

#### 参考文献:

- [1] 曹永强,高璐,朱明明,等.水资源系统脆弱性的评价方法及其应用[J].人民黄河,2016,38(9):46-49+73.
- [2] 常玉苗.区域水资源环境竞争力评价及空间差异研究[J].节水灌溉,2018(2):88-92.
- [3] World Economic forum. Global risks 2015[R]. 10th edition World Economic Forum, Geneva; 2015.
- [4] JUN Xia, CHEN Junxu, WENG Jianwu et al. Vulnerability of water resources and its spatial heterogeneity in Haihe River Basin, China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(5):525-539.
- [5] 雒新萍,夏军,邱冰,等.中国东部季风区水资源脆弱性评价[J].人民黄河,2013,35(9):12-14+20.
- [6] 马冬梅,陈大春.基于熵权法的模糊集对分析模型在乌鲁木齐市水资源脆弱性评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(9):36-40.
- [7] 刘倩倩,陈岩.基于熵权法的流域水资源脆弱性评价——以淮河流域为例[J].长江科学院院报,2016,33(9):10-17.
- [8] 刘瑜洁,刘俊国,赵旭,等.京津冀水资源脆弱性评价[J].水土保持通报,2016,36(3):211-218.
- [9] 王正选,王静,杨婷婷,等.基于改进熵权法的水资源承载力评价——以曲陆坝区为例[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):82-87.
- [10] 苏贤保,李勋贵,刘巨峰,等.基于综合权重法的西北典型区域水资源脆弱性评价研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):112-118.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 董雪妍.基于GIS与ANN方法的花溪河流域岩溶地下水脆弱性评价[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [14] SHEKHAR S, PANDEY A C, TIRKEY A S. A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in hard rock granitic aquifer[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(3):1385-1401.
- [15] 姜海波,冯斐,周阳.塔里木河流域水资源脆弱性演变趋势及适应性对策研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):81-84.
- [16] 周翔南,方洪斌,靖娟,等.区域水资源系统脆弱性评价研究[J].人民黄河,2017,39(11):47-52.
- [17] 乔萌萌.苏州市水资源脆弱性研究[D].苏州:苏州科技大学,2017.
- [18] 王正选,邱金亮,王静,等.基于改进模糊集对评价法的水资源承载力评价——以龙川江流域为例[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):70-75.
- [19] 赵强,李秀梅,高倩,等.基于模糊综合评判的山东省水资源承载力评价[J].生态科学,2018,37(4):188-194.
- [20] 夏军,翁建武,陈俊旭,等.多尺度水资源脆弱性评价研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(S1):1-14.
- [21] 钱龙霞,王红瑞,张韧,等.基于投影寻踪的水资源脆弱性S型函数模型及其应用[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):185-196.
- [22] 宝鸡市统计局.宝鸡统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1999-2015.
- [23] 宝鸡市水利局.宝鸡市水资源公报[M].西安:陕西省水利厅,1999-2015.
- [24] 马慧敏.基于DPSIR模型的山西省水资源可持续性评价[D].太原:太原理工大学,2015.
- [25] 张星星,王艳.基于熵值法的关天经济区新型城镇化发展水平及空间差异分析[J].宝鸡文理学院学报(自然科学版),2016,36(4):53-58.
- [26] 王富喜,毛爱华,李赫龙,等.基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J].地理科学,2013,33(11):1323-1329.