

基于 DPSIR 模型的陕西省水安全评价及障碍因子诊断

郭嘉嘉¹, 李占斌¹, 李鹏^{1,2}, 许垚涛¹, 杨志³, 任正龔³

(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, 西安 710048;

2.旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048; 3.宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002)

摘要:水资源安全评价是水资源保护和规划的基础,为了提高区域水安全,迫切需要定量评估水安全情况并对其障碍因子进行诊断。该文基于 DPSIR 模型建立了水安全评价指标体系,结合单指标量化-多指标综合-多准则综合(SMI-P)的量化方法和耦合协调度模型,对陕西省水安全健康状态做出评估,并运用障碍度模型分析了影响水安全的主要因素。结果表明:2000—2018 年陕西省水安全状态经历了从“较不安全”状态向“基本安全”状态发展,但驱动力和影响子系统的安全度有所下降,应加强对水资源有限性以及城市社会发展的重视。水安全子系统耦合协调度逐年提高,实现由中级协调到良好协调的转变,2018 年系统耦合度高达 0.815,系统间相互依赖相互作用程度较高。人均 GDP、恩格尔系数、人均日生活用水量以及人均水资源量是制约陕西省水安全状态提升的主要障碍因子,可以更好地为制定和采取相关措施来提高水安全状态提供科学依据。综上,陕西省水安全状态整体趋势向好,经济与水资源情况为主要制约因素。

关键词:水安全; DPSIR 模型; 熵值法; 障碍度模型; 陕西省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0149-07

Evaluation of Water Security and Obstacle Factor Diagnosis of Shaanxi Province Based on DPSIR Model

GUO Jiajia¹, LI Zhanbin¹, LI Peng^{1,2}, XU Yaotao¹, YANG Zhi³, REN Zhengyan³

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.State Key Laboratory of National Forestry

and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions,

Xi'an 710048, China; 3.Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Water resources security assessment is the basis of water resources protection and planning. In order to improve regional water security, it is urgent to evaluate water security quantitatively and diagnose its obstacle factors. In this study, a water security evaluation index system was established based on DPSIR model. Combining with the quantization method of single index quantization, multiple index synthesis, multiple criteria synthesis (SMI-P) and coupled coordination degree model, we evaluated the water security and health status of Shaanxi Province, and analyzed the main factors affecting water security by using obstacle degree model. The results show that from 2000 to 2018, the state of water security in Shaanxi Province had experienced the development from ‘less safe’ to ‘basic safe’, but the security degree of driving force and influence subsystem had decreased, so more attention should be paid to the limitation of water resources and urban social development; the coupling coordination degree of water security subsystem increased year by

收稿日期:2021-12-02

修回日期:2022-03-08

资助项目:国家林业和草原局自主研发项目计划“黄河流域生态用水与林草植被格局优化配置”(LC-6-06);国家自然科学基金“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204)

第一作者:郭嘉嘉(1996—),女,山西临汾人,硕士研究生在读,研究方向为水沙变化。E-mail:guojiajia0619@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lipeng74@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

year, realizing the transformation from moderate imbalance to good coordination; in 2015, the coupling degree of the system was as high as 0.804, and the degree of mutual dependence and interaction between the systems was high; however, due to the reduction of the safety value of driving force, the coupling coordination state of the system changed to mild imbalance in 2018; GDP per capita, Engel's coefficient, daily water consumption per capita and the proportion of water quality monitoring sections reaching the standard were the main obstacles to the improvement of water security in Shaanxi Province, which could provide a scientific basis for formulating and taking relevant measures to improve water security. The overall trend of water security in Shaanxi Province is good, and economy and water resources are the main restricting factors.

Keywords: water security; DPSIR model; entropy method; obstacle model; Shaanxi Province

2020 年习近平总书记来陕考察时指出,陕西省要深度融入共建“一带一路”大格局中,构建内陆地区的重要国际贸易通道^[1]。陕西省作为“丝绸之路经济带新起点”,必将在“一带一路”倡议中扮演举足轻重的作用^[2]。近年来,陕西省经济在西部大开发中得到了飞速发展,与此同时也面临着水资源匮乏、地下水过度开采等一系列水安全问题^[3]。

近些年来针对区域水安全问题,众多学者从不同角度进行了研究。Liu 等^[4]针对全中国的水安全形势,分析评价了中国水安全状态的时空分布特点;江红等^[5]以亚太地区为研究对象,从生活、经济、城市、环境水安全和水灾害防御 5 个方向综合评估了亚太 47 个国家的水安全状况;张修宇等^[6]立足郑州市,较为详细地分析了该市 2013—2017 年的水安全变化状况。在水安全评价方法方面,学者们主要是基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型^[7-8]、水贫困指数(WPI)^[9-10]和动力系统模型(SDM)等^[11]来建立水安全评价指标体系,采用模糊数学分析法^[12]、层次分析法^[6]、主成分分析法^[13]、隶属度分析法^[14]、BP 神经网络等^[15]方法进行分析计算。然而影响水安全的因子众多,评判主要影响因素至关重要,而障碍度模型就是通过计算寻找影响事物或目标的障碍因子,进而对系统进行全面诊断的数学统计模型。因此本研究在已有研究基础上,基于 DPSIR 模型构建水安全评价指标体系,以熵权 SMI-P(单指标量化-多指标综合-多准则综合)模型及和耦合协调度模型,评估陕西省水安全状态,并运用障碍度模型识别影响水安全状态的关键因素,以期对陕西省在“一带一路”新机遇下更好更快发展提供更多的理论依据。

1 研究区概况及数据来源

陕西省位于我国西北地区,黄河中游,东邻山西、河南,西连宁夏、甘肃,南抵四川、重庆、湖北,北接内蒙古,介于东经 105°29′—111°15′,北纬 31°42′—39°35′,省

内地貌由南到北依次为秦巴山地、关中平原和陕北高原。陕西省属于大陆性季风气候区,降水时空分布不均。陕西省年均水资源总量为 $4.953 \times 10^{10} \text{ m}^3$,仅占全国的 1.71%;人均水资源量 $1\,279.8 \text{ m}^3/\text{人}$,相当于全国平均水平的 61.60%^[16-17]。长期以来,过快的城市化进程以及经济的迅猛发展,给水资源安全带来了一定的压力^[18]。

本研究数据来源于《中国统计年鉴》《陕西省水资源公报》和《陕西省统计年鉴》。选取陕西省 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年的数据对陕西省水安全健康值进行综合评价。

2 研究方法

2.1 水安全综合评价指标体系构建

DPSIR 模型是一种在环境系统中广泛使用的概念模型,描述了人类活动与生态环境的相互作用。模型包括驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)以及响应(R)5 个部分,可以有效反馈区域生态环境和经济社会的发展现状^[19-20]。本研究基于 DPSIR 概念模型,结合陕西省实际情况,选择构建了以驱动力、压力、状态、影响、响应为准则层以及对应 22 个指标组成的指标层的陕西省水安全综合评价指标体系,见表 1。

2.2 熵值法

指标权重的计算对于评估结果具有重要影响,22 个评价指标对区域水安全的影响程度不同,因此,需要合理确定各指标权重。本文使用客观权重确定法——熵值法来确定各指标权重,具体方法如下^[21]:

(1) 无量纲化。使用归一化方法对各个指标数据进行无量纲化处理。

$$\begin{cases} x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} & (\text{正向指标}) \\ x'_{ij} = \frac{x_{i\max} - x_{ij}}{x_{i\max} - x_{i\min}} & (\text{负向指标}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x'_{ij} 为第 j 年第 i 项指标的值; $x_{i\min}$, $x_{i\max}$ 为第 i

项指标的最小值、最大值。

(2) 计算第 i 项指标的熵值 e_i 。

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m (x'_{ij} / \sum_{j=1}^m x'_{ij}) \cdot \ln(x'_{ij} / \sum_{j=1}^m x'_{ij}) \quad (2)$$

表 1 陕西省水安全综合评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标方向	单位
驱动力(R)		GDP 增长率(x_1)	正向	%
		人口自然增长率(x_2)	反向	%
		单位面积水资源量(x_3)	正向	$10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$
		万元产值用水量(x_4)	反向	$\text{m}^3/\text{万元}$
		农业用水率(x_5)	反向	%
压力(P)		生态用水率(x_6)	反向	%
		人均日生活用水量(x_7)	反向	$\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$
		工业万元产值取水率(x_8)	反向	$\text{m}^3/\text{万元}$
		人均水资源量(x_9)	正向	$\text{m}^3/\text{人}$
		水资源利用率(x_{10})	反向	%
水安全 状态(S)		水质监测断面达标比例(x_{11})	正向	%
		人均 GDP(x_{12})	正向	万元
		恩格尔系数(x_{13})	反向	%
		森林植被覆盖率(x_{14})	正向	%
		城市化率(x_{15})	反向	%
影响(I)		建成区绿化覆盖率(x_{16})	正向	%
		第三产业增加值比重(x_{17})	正向	%
		用水普及率(x_{18})	正向	%
		城市生活污水处理率(x_{19})	正向	%
		工业固废综合利用率(x_{20})	正向	%
响应(R)		水利及公共设施投资占比(x_{21})	正向	%
		万人在校大学生数(x_{22})	正向	万人

(3) 计算第 i 项指标的权重 λ_i 。

$$\lambda_i = g_i / \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

式中: g_i 为差异性系数, $g_i = 1 - e_i$ 。

(4) 依据熵值法的可加性,先计算指标层各个差异性系数 g_i 之和,记作 $G_k, k = 1, 2, \dots, N$,再据下式计算相应准则层权重。

$$\omega_k = G_k / \sum_{k=1}^N G_k \quad (4)$$

2.3 单指标量化-多指标综合-多准则综合(SMI-P)评价方法

本文考虑到模糊分析法在复杂巨系统中的优势,使用 SMI-P 量化研究方法^[22-23]对陕西省水安全进行评价。

(1) 单指标量化。采用分段线性隶属度量化各指标的子安全度,大小为 $0 \sim 1$ 。用 a, b, c, d, e 来代表各指标的最差值、较差值、及格值、较优值和最优值。相关计算公式见公式(5—6)。

$$\text{ISD}_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_i \\ 0.3 \frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} & a_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 + 0.3 \frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} & b_i < x_i \leq c_i \\ 0.6 + 0.2 \frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} & c_i < x_i \leq d_i \\ 0.8 + 0.2 \frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} & d_i < x_i \leq e_i \\ 1 & e_i < x_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{ISD}_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq e_i \\ 0.8 + 0.2 \frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} & e_i < x_i \leq d_i \\ 0.6 + 0.2 \frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} & d_i < x_i \leq c_i \\ 0.3 + 0.3 \frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} & c_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 \frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} & b_i < x_i \leq a_i \\ 0 & a_i < x_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_i 和 ISD_i 分别为第 i 项指标的指标值和子安全度。

参考多年全国平均水平及国家和省级发展规划划定,同时考虑国民经济发展特点,以及陕西省水资源环境的具体实情,将陕西省水安全评价标准区间进行划分(表 2)。

(2) 多指标综合。利用熵值法确定指标权重大小 λ_i ,再计算 5 个准则层的安全度如下:

$$X_k = \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_i \cdot \text{ISD}_i \quad (7)$$

式中: X_k 为第 k 个准则层的安全度, $k = 1, 2, \dots, 5; \lambda_i$ 为第 i 个指标权重; n_k 分别为 3, 5, 6, 4, 4。

(3) 多准则综合。根据得到的准则层的安全度,通过多准则集成,综合量化水安全度,计算公式如下:

$$\text{WSD} = \sum_{k=1}^N \omega_k X_k \quad (8)$$

式中: ω_k 为第 k 个准则层的权重。

基于评价得到的水安全结果,等间隔将区域水安全程度分为 6 个水平,具体见表 3。

2.4 耦合协调度模型

耦合协调度模型用于分析事物的协调发展水平。耦合度指两个或两个以上系统之间的相互作用影响相互依赖相互制约程度。协调度指耦合相互作用关系中良性耦合程度的大小,体现了协调状况的好坏^[24-25]。本研究建立驱动力—压力—状态—影响—响应的耦合协调度模型,公式如下:

$$C(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = 5 \left[\frac{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5}{(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5)^5} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (9)$$

$T=\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4+\beta_5X_5$
 $D=\sqrt{C\times T}$

(10)
(11)

响应子系统的安全度值; T 为协调指标, $\beta_1-\beta_5$ 为调节系数,本文认为驱动力、压力、状态、影响、响应子系统同等重要,故调节系数均为 0.20; D 为耦合协调度。

表 2 陕西省水安全评价指标标准区间

准则层	指标层	最差值(a)	较差值(b)	及格值(c)	较优值(d)	最优值(e)
驱动力	GDP 增长率/%	4	5	6	7	10
	人口自然增长率/%	8	6	4	2	1
	单位面积水资源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	60	97.5	165	232.5	300
	万元工业产值用水量/(m ³ /万元)	100	80	50	40	30
压力	农业用水率/%	75	60	55	50	40
	生态用水率/%	5	4	3	2	1
	人均日生活用水量/[L/(人·d)]	400	320	240	160	90
	万元产值废污水排放量/(m ³ /万元)	40	30	20	15	10
状态	人均水资源量/(m ³ /人)	750	1200	2000	2500	3000
	水资源利用率/%	50	40	30	20	10
	水质监测断面达标比例/%	50	65	75	85	100
	人均 GDP/万元	3	4	6	8	10
影响	恩格尔系数/%	60	50	40	30	20
	森林植被覆盖率/%	30	40	50	55	60
	城市化率/%	80	75	65	58	50
	建成区绿化覆盖率/%	36	38	40	42	50
相应	第三产业增加值比重/%	30	40	50	55	60
	用水普及率/%	80	90	95	97	100
	城市生活污水处理率/%	50	60	75	90	100
	工业固废综合利用率/%	60	70	85	90	100
	水利及公共设施投资占比/%	1.2	3	4.5	7	12
	万人在校大学生数/人	100	150	250	350	600

表 3 区域水安全划分

水安全水平	WSD 的取值范围
安全	0.83≤WSD≤1
较安全	0.67≤WSD<0.83
基本安全	0.5≤WSD<0.67
较不安全	0.33≤WSD<0.5
不安全	0.17≤WSD<0.33
严重不安全	0≤WSD<0.17

2.5 障碍度模型

对影响陕西省水安全的主要障碍因素进行分析与诊断,可以针对性地制定和调整城市水资源政策。本文引入因子贡献度、指标偏离度和障碍度 3 个指标,构建障碍度模型来确定影响陕西省水资源安全的主要障碍因子^[26-27]。公式如下:

$$P_i=1-x'_i$$
(12)

$$\alpha_i=\frac{P_i\times Y_i}{\sum_{i=1}^n(P_i\times Y_i)}$$
(13)

式中: P_i 为指标偏离度; Y_i 为因子贡献度,表示因子对总目标的权重,即各指标权重 λ_i 与对应准则层权

重的乘积; α_i 为障碍度,表示单个指标对水安全的影响; x'_i 为标准化后的指标值。

3 结果与分析

3.1 驱动力、压力、状态、影响、响应子系统及水安全度分析

根据陕西省实际情况,采用熵值法,根据(公式 1—4)计算指标层和准则层的权重,再利用计算结果,依据 SMI-P 方法求出陕西省 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年各准则层的安全度与综合水安全度,见表 4。

表 4 陕西省水安全综合评价结果

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
驱动力(X_1)	0.61	0.64	0.66	0.62	0.57
压力(X_2)	0.49	0.52	0.54	0.65	0.71
状态(X_3)	0.38	0.35	0.34	0.49	0.62
影响(X_4)	0.75	0.71	0.78	0.7	0.61
响应(X_5)	0.78	0.78	0.83	0.86	0.84
WSD	0.46	0.45	0.46	0.57	0.65
水安全评价结果	较不安全	较不安全	较不安全	基本安全	基本安全

分析表 4 可知,2000—2018 年,从水安全度绝对水平来看,陕西省水安全状态逐渐向好,从“较不安全”状态提升为“基本安全”状态。从水安全度相对水平来看,陕西省水安全度的增长速度经历了一个跳跃式增长,在 2015 年时水安全度从 0.46 增长到 0.57。为了尽可能分析全面,本文将研究期分为两个阶段。

在第一阶段(2000—2010 年),陕西省水安全均为“较不安全”状态,水安全度趋于稳定,在 0.46 左右。分析发现主要原因在于,在“十一五”规划之前,我国以发展经济为主要目标,推进改革开放,并未对产业结构、生态环境、城市建设等提出要求;在“十一五”规划中提出建设资源节约型、环境友好型社会,但其所产生的经济社会效应很难立刻显现出来。因此众多因素使得这一阶段的水安全状态较低,水安全健康值无明显变化。

在第二阶段(2015—2018 年),陕西省水安全上升为“基本安全”状态,水安全度持续增加,从 2015 年的 0.57 上升为 0.65。主要原因在于,经过“十一五”建设之后,陕西省的生态文明建设方面取得重大成就^[28],在“十二五”期间,又针对残留的城乡区域发展不协调,经济增长的资源环境约束强化等问题做出了相应的对策。因政策实施与执行效果逐步显现,故而在第二阶段的水安全状态提高,水安全度大幅度提升。

为更好地对陕西省水安全状态进行系统评价,进一步分析了影响水安全状态的五大子系统变化,分析结果如下:

(1) 响应子系统(X_5)的安全度一直处于 0.78 以上,只在 2018 年又小幅度下降,但系统仍处于安全状态。随着城市经济建设以及市民环保意识的提升,水利及公共设施投资占比逐年上升,各项成果成效显著,但是在 2018 年工业固废综合利用率相较 2015 年下降了 45.61%,导致在 2018 年响应子系统安全度有小幅下降。

(2) 状态子系统(X_3)的安全状态最差,长期处于“较不安全”状态;2000—2010 年,状态子系统呈不显著下降趋势,系统在 2010 年安全值达到最低,2010—2018 年,状态子系统的安全度呈快速上升趋势,在 2015 年到达“基本安全”的临界值,2018 年,状态子系统已处于“基本安全”状态。人均 GDP 和水资源利用率在研究期内大幅度上升,分别为 879.58%,92.52%,这使得状态子系统的安全度涨幅迅速。

(3) 影响子系统(X_4)在 2010 年之前变化不显著,2010 年以后显著下降;在 2000—2015 年一直处于“较安全”状态,2018 年下降为“基本安全”状态。分析其原因可能是因为城市化进程过快导致的。

(4) 驱动力子系统(X_1)一直处于“基本安全”状态,但与影响子系统类似,在 2010 年以后安全值显著下降。2010 年以后单位面积水资源量 2015 年比 2010 年下降了约 30%,GDP 增长率 2015 年比 2010 年下降了约 50%,表明陕西省水资源的有限性和社会经济发展的问题渐渐凸显。

(5) 压力状态系统(X_2)有明显的上升趋势,从 2000 年的“较不安全”上升到 2018 年的“较安全”状态。表明在驱动力的推动下产生的陕西省的直接水安全问题,如用水量、用水率等问题有所好转。

3.2 耦合协调度分析

采用耦合协调度模型计算得到陕西省水安全子系统耦合协调度,并给出系统耦合协调度的状态^[29](表 5)。由表 5 可知,2000—2018 年,系统耦合协调度整体呈上升趋势,由中级协调状态变为良好协调状态,与准则层的评价结果相一致。系统从 2000—2010 年处于中级协调状态,驱动力与压力子系统有所进步,但状态子系统依然滞后;在 2015 年与 2018 年,驱动力、压力、状态、影响、响应同步发展,表明各子系统之间存在着紧密的相互依赖的关系,系统均属于良好协调状态。

表 5 陕西省水安全子系统耦合协调度

年份	耦合度 (C)	协调指数 (T)	耦合协调度 (D)	类型	状态
2000	0.966	0.602	0.763	驱动力进步、影响、响应同步发展-压力、状态滞后型	中级协调
2005	0.963	0.600	0.760	驱动力、压力进步、影响、响应同步发展-状态滞后型	中级协调
2010	0.954	0.630	0.775	驱动力、压力进步、影响、响应同步发展-状态滞后型	中级协调
2015	0.984	0.664	0.808	驱动力、压力、状态、影响、响应同步发展	良好协调
2018	0.990	0.670	0.815	驱动力、压力、状态、影响、响应同步发展	良好协调

3.3 障碍因子诊断

陕西省水安全状态出现转折变化,为了进一步寻找

原因,本文利用障碍度模型,计算 5 个准则层和 22 个指标的障碍度,基于障碍度排序,展开深度诊断分析,确定

影响陕西省水安全的主要准则层和主要障碍因子。

3.3.1 准则层障碍因子诊断 如图 1 所示,5 个准则层对陕西省水安全的障碍度存在一定差异,但总体变化均不明显。整体来看,状态层障碍度最高,在 65.80%~74.08%,2010 年障碍度最高,之后明显下降,下降了 11.18%;其次是压力层,变化不显著,极差仅为 2.82%;响应层的障碍度最低,在 2.43%~3.59%,经历了先下降后上升的变化趋势;驱动力层与影响

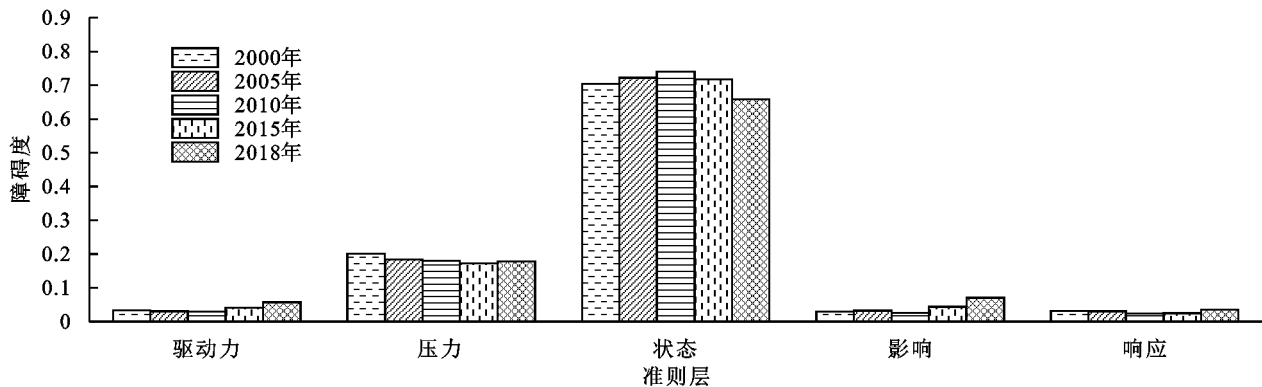


图 1 陕西省水安全准则层障碍度变化

3.3.2 指标层障碍因子诊断 依据系统障碍度分析,列出排名前 5 的障碍度因子(表 6),并将研究期分为 2000—2010 年和 2015—2018 年两个阶段进行分析。

在第一阶段,人均 GDP(x_{12})、恩格尔系数(x_{13})这两个指标一直稳居前两位,水质监测断面达标比例(x_{11})、水利及公共设施投资占比(x_{21})等出现在后三位。从累积障碍度来看,累积障碍度最高的是人均 GDP(x_{12}),三年累计障碍度为 60.42%,表明社会经济发展是这一阶段制约陕西省水安全的重要因素;障碍度第二位的因子是恩格尔系数(x_{13}),障碍度从 2000 年的 16.17% 上升到 2010 年的 20.52%,成为 2010 年排名异地的障碍因子,反映出人民生活水平有待提高,居民生活质量成为制约水安全的另一因素。

随着政府精准扶贫取得显著成效,使得陕西省经济水平与生活水平有机明显提高,人均 GDP(x_{12})、恩格尔系数(x_{13})不再是主要的障碍因子。在 2015 年和 2018 年间,影响陕西省水安全的主要障碍因子变为水资源利用率(x_{10})、人均日生活用水量(x_7)、人均水资源量(x_9)等。排名第一的障碍因子是人均日生活用水量(x_7),两年累计障碍度为 41.83%,尤其是在 2018 年达到 29.14%,比 2015 年增长了 129.63%;第二位障碍因子为人均水资源量(x_9),两年累计障碍度为 37.04%,2015—2018 年又小幅度的增加。两个障碍因子均表明在这一阶段限制水安全状态的提升主要是在于人口的增加以及水资源的有限性。

层的障碍度相差不大,平均值在 4% 左右,障碍度均在 2010 年之后有不同程度的增加。由此可见,状态层始终是制约陕西省水安全的主要因素。故而,提高陕西省水安全状态,应重点关注状态层指标,例如人均水资源量、人均 GDP 等,进一步统筹协调水资源与人口、社会经济发展与环境保护的关系,探索和采用更加高效的水资源利用模式,促进陕西省水安全状态的提升。

表 6 陕西省水安全主要因子障碍度						%
障碍度排名	年份	2000	2005	2010	2015	2018
1	因子	x_{12}	x_{12}	x_{13}	x_{10}	x_7
	障碍度	21.53	23.54	20.52	17.11	29.14
2	因子	x_{13}	x_{13}	x_7	x_9	x_9
	障碍度	16.17	19.38	18.59	17.09	19.94
3	因子	x_7	x_{11}	x_{11}	x_7	x_{10}
	障碍度	14.27	15.55	17.16	12.69	19.36
4	因子	x_{11}	x_{21}	x_{12}	x_{11}	x_{15}
	障碍度	10.53	10.08	15.36	10.52	11.40
5	因子	x_{21}	x_{14}	x_{21}	x_{12}	x_2
	障碍度	8.63	6.91	8.65	8.88	9.27

4 结论与建议

本研究基于 DPSIR 模型,构建陕西省水安全综合评价体系;结合 SMI-P 方法与耦合协调度模型,对水安全健康情况进行综合评价;同时利用障碍度模型分析影响水安全的主要因子。结论如下:(1) 2000—2018 年,陕西省水安全状态由“较不安全”状态提升为“基本安全”状态,整体呈现转好态势。从水安全子系统来看,响应、状态以及压力子系统的安全度整体呈上升趋势;驱动力和影响子系统的安全度呈下降趋势,在“基本安全”和“较安全”状态附近波动。(2) 水安全子系统耦合协调度逐年提高,实现由中度协调到良好协调的转变,2018 年系统耦合度最高,为 0.815,系统间相互依赖相互作用程度较高。(3) 从准则层障碍度看,影响陕西省水安全的最大准则层障碍因素

为状态层。从指标层障碍度看,人均 GDP、恩格尔系数、人均日生活用水量以及人均水资源量是制约陕西省水安全状态提升的主要障碍因子,表明社会经济发展、居民生活水平以及水资源的有限性是制约陕西省水安全的重要因素。

为了使陕西省水安全状态持续向好发展,应以实体经济为根本,以数字经济为引领,以转型升级为重点,加快构建现代产业集群,优化产业布局,实现经济高质量发展;加强农村低收入人口常态化帮扶,解决居民贫困;加快县域城镇化步伐,健全城乡融合发展机制,以增强城乡区域发展协调性。在发展经济的同时,还要持续改善环境质量,严格水生态环境管理,健全陆域水域统筹管理机制,加强城乡污水处理设施建设,深化黑臭水体综合治理,保护水源,提高水资源利用率。

参考文献:

- [1] 郭社荣.深入学习贯彻习近平总书记来陕西考察重要讲话 奋力谱写陕西民政新时代追赶超越新篇章[N].中国社会报,2020-07-21(001).
- [2] 宋宇,谭仁超.建设“丝绸之路经济带”的战略构想与陕西机遇[J].西安财经学院学报,2015,28(2):73-78.
- [3] 中国工程院“西北水资源”项目组.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[J].中国工程科学,2003,5(4):1-26.
- [4] Liu B, Zhang F L, Qin X S, et al. Spatiotemporal assessment of water security in China: An integrated supply-demand coupling model[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,321:1-16.
- [5] 江红,杨小柳.基于熵权的亚太地区水安全评价[J].地理科学进展,2015,34(3):373-380.
- [6] 张修宇,秦天,孙菡芳,等.基于层次分析法的郑州市水安全综合评价[J].人民黄河,2020,42(6):42-45,52.
- [7] 向红梅,金腊华.基于 DPSIR 模型的区域水安全评价研究[J].安全与环境学报,2011,11(1):96-100.
- [8] Shi K, Bai Y J, Guo Y R, et al. Assessment of regional water resource security: A case study from Hebei Province, China[J]. Tehnički Vjesnik, 2020,27(6):1781-1790.
- [9] 贡力,靳春玲.基于水贫困指数的城市水安全评价研究[J].水力发电学报,2014,33(6):84-90.
- [10] Schimpf C, Cude C. A systematic literature review on water insecurity from an Oregon public health perspective [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(3):1-23.
- [11] Sahin O, Stewart R A, Porter M G. Water security through scarcity pricing and reverse osmosis: a system dynamics approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015,88:160-177.
- [12] 王志敏.张掖市水安全的定量评价[D].兰州:西北师范大学,2006.
- [13] 何刚,阮君,王莹莹,等.基于 Lotka_Volterra 模型的区域水资源安全测度[J].水利水电技术(中英文),2021,52(9):48-56.
- [14] 张志君.天山北坡经济带水资源安全评估[J].水利规划与设计,2021(6):15-19,140.
- [15] 胡昌军.双隐层 BP 神经网络模型在区域水安全评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2013,24(3):196-200.
- [16] 张淑兰,张海军,张盍傲,等.陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J].人民长江,2021,52(4):130-136.
- [17] 刘建军,康永祥,马长欣,等.陕西省森林固碳增汇功能评估[C]//省科学技术协会,省环境保护厅,西安交通大学.低碳陕西学术研讨会论文集,西安:2010.
- [18] 汪芳,王舜奕, PROminSKI Martin.城镇化与地方性中的水资源:可持续视角的水环境保护利用与水空间规划设计[J].地理研究,2018,37(12):2576-2584.
- [19] 陈珂,郝奇琛,邵景力,等.基于 DPSIR 模型的地下水饮用水源地安全评价指标体系研究[J].水文,2021,41(2):20-25.
- [20] 赵翔,贺桂珍.基于 CiteSpace 的驱动力-压力-状态-影响-响应分析框架研究进展[J].生态学报,2021,41(16):6692-6705.
- [21] 陈启明,陈华友.改进的熵值法在确定组合预测权系数中的应用[J].统计与决策,2011(13):159-160.
- [22] 王浩,胡春宏,王建华,等.我国水安全战略和相关重大政策研究[M].北京:科学出版社,2019.
- [23] 左其亭,张云,林平,等.人水和谐评价指标及量化方法研究[J].水利学报,2008,39(4):440-447.
- [24] 姜晓艳,吴相利.林业资源型城市生态-经济-社会协调发展的定量测度:以黑龙江省伊春市为例[J].生态学报,2021,41(21):1-12.
- [25] 舒小林,高应蓓,张元霞,等.旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(3):82-90.
- [26] 朱凯.基于障碍诊断的农村建设用地集约利用调控研究:以重庆市九龙坡区为例[D].重庆:西南大学,2014.
- [27] 葛艳艳,王伟,樊骋.基于 DPSIR_TOPSIS 模型的安徽省耕地生态安全评价及其障碍因子研究[J].山东农业大学学报:社会科学版,2021,23(2):80-85.
- [28] 王美红,李卓,高兵.陕西省“十二五”生态环境建设的思路与对策研究[C]//成都:中国环境科学学会学术年会,2014.
- [29] 孙斌,徐渭,薛建春,等.黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测[J].地球科学与环境学报,2021,43(5):887-896.