

蒋忙舟,杨 志,张晓明,等. 基于 DPSIR 模型的西北五省区水安全评价[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 535-544.

JIANG Mang-zhou, YANG Zhi, ZHANG Xiao-ming, et al. Assessment of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang, Northwest China Based on DPSIR Model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 535-544.

DOI:10. 19814/j. jese. 2022. 04004

• 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 •

基于 DPSIR 模型的西北五省区水安全评价

蒋忙舟¹, 杨 志², 张晓明³, 李 鹏^{4,5*}, 许垚涛⁴,
赵 阳³, 任宗萍⁴, 王得军⁶, 文妙霞⁶

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 宁夏 银川 750002; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 4. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 5. 旱区生态水文与灾害防治国家林草局重点实验室, 陕西 西安 710048; 6. 国家林业和草原局西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048)

摘 要:有效评价区域水安全和确定影响水安全的因素是实现水资源供应和需求之间可持续平衡的重要基础。基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型构建西北五省区水安全评价指标体系,采用隶属度函数、耦合协调度模型和障碍度模型,定量研究了西北五省区水安全动态变化、协调发展水平,并识别出影响水安全度的障碍因子。结果表明:西北五省区水安全度呈现变好的趋势,至 2018 年,陕西和青海水安全处于基本安全水平,甘肃、宁夏、新疆水安全处于较不安全水平;水安全子系统的耦合协调度与水安全变化相一致,2018 年陕西水安全子系统耦合协调度等级为中级协调,甘肃、青海、新疆水安全子系统为初级协调,宁夏水安全子系统为勉强协调;GDP 增长率、第三产业增长比重、城市化率是影响陕西、甘肃、宁夏、青海水安全度现状的主要障碍因子,而新疆水安全度主要受水资源利用率、单位面积水资源量、城市化率的影响。

关键词:水安全; DPSIR 模型; 耦合协调度; 障碍因子; 陕西; 甘肃; 宁夏; 青海; 新疆

中图分类号: X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2022)03-0535-10

Assessment of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang, Northwest China Based on DPSIR Model

JIANG Mang-zhou¹, YANG Zhi², ZHANG Xiao-ming³, LI Peng^{4,5*}, XU Yao-tao⁴,
ZHAO Yang³, REN Zong-ping⁴, WANG De-jun⁶, WEN Miao-xia⁶

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 5. Key Laboratory National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 6. Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Effective evaluation of regional water security and identification of factors affecting

收稿日期: 2022-04-02; 修回日期: 2022-05-12 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779204); 国家林业和草原局自主研发项目(LC-6-06);

陕西省创新人才推进计划项目(2018TD-037)

作者简介: 蒋忙舟(1976-), 男, 陕西渭南人, 高级工程师, E-mail: 331945747@qq.com。

* 通讯作者: 李 鹏(1974-), 男, 山东烟台人, 教授, 博士研究生导师, 农学博士, E-mail: lipeng74@163.com。

water security are important basis for achieving a sustainable balance between water supply and demand. Based on driving force-pressure-state-impact-response (DPSIR) model, the water security evaluation index system for Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang was constructed, the membership function, coupled coordination degree model and barrier degree model were used to quantitatively study the dynamic changes and coordination development level of water security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang, and to identify the barrier factors affecting the water security. The results show that the water security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and the Xinjiang show a trend of becoming better, and the water security in Shaanxi and Qinghai is at the basic safety level, and that in Gansu, Ningxia and Xinjiang is at a less safety level in 2018; the coupling coordination of water security subsystem is consistent with the changes in water security, and the water security subsystem in Shaanxi is at an intermediate level of coordination, that in Gansu, Qinghai, and Xinjiang is at a primary level of coordination, and that in Ningxia is at a barely level of coordination in 2018; the growth rate of GDP, proportion of tertiary industry growth, and urbanization rate are the main obstacle factors affecting the status of water security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, and Qinghai, while water security in Xinjiang is mainly affected by water resources utilization rate, water resources per unit area, and urbanization rate.

Key words: water security; DPSIR model; coupling coordination degree; obstacle factor; Shaanxi; Gansu; Ningxia; Qinghai; Xinjiang

0 引言

水是维持区域社会和经济可持续发展的重要资源,同时也是区域自然生态系统良性循环的重要资源^[1-2]。“水安全”一词最早起源于 20 世纪 40 年代,自 2000 年世界水论坛发表《21 世纪水安全:海牙世界部长级会议宣言》以来,水安全备受人类关注^[3]。水资源安全研究主要包括:水安全测度、水资源管理、水安全评价^[4]。水安全系统包括水资源安全子系统、水环境安全子系统、水生态安全子系统以及其他子系统,系统之间相互制约、相互依赖^[2]。同时,水安全系统与社会经济系统密切相关,是社会经济系统可持续发展的基础^[5]。水安全系统的优劣往往会导致深层次的社会经济问题,如粮食安全、生态安全等。因此,作为水资源管理基础的水安全评价成为学者们研究的热点之一。

目前,水安全评价主要通过建立评价指标体系进行研究^[6-7]。从评价角度来看,研究主要集中在水资源供需平衡、区域水资源承载能力和区域水安全评价中的水足迹^[8]。从评价方法来看,大致可分为 5 种:①主成分分析法^[9],往往由于主成分的含义较为模糊,使得水安全的分级标准难以确定,导致存在一定的主观性;②模糊评价法^[10-11],在处理多层次问

题上具有一定的优势,但易受到人为的干扰;③层次分析法^[12],与模糊评价法有同样的缺陷;④系统动力学(SD)模型^[13],能够较好地解决水安全系统中的复杂问题,但大多数研究集中在水安全单个子系统问题上;⑤目标规划模型^[14]、投影寻踪回归模型^[15]等。然而,为了准确评价区域水安全,往往需要从不同的维度构建水安全评价指标体系,满足水安全评价的需求,但评价指标体系子系统之间的耦合协调关系鲜有学者进行研究,同时针对评价结果具体受到哪些因子的制约也未进一步分析。

近年来,气候变化和快速的城市化导致用水量稳步增加并诱发严重的水危机^[16-17]。陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆地处中国西北干旱区,水资源短缺、生态环境脆弱、水资源过度开发和水环境污染等问题导致水安全隐患突出^[18-20]。因此,本文基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型从社会、经济、资源、生态 4 个方面建立西北五省区水安全评价指标体系,采用单指标量化-多指标综合-多准则综合法(SMI-P)分析水安全发展格局,并分析驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统间的耦合协调度,在此基础上构建障碍度模型,进一步对水安全度的障碍因子进行分析,以期为进一步改善西北五省区水资源管理提供参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

以西北五省区(陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆)为研究区,选择 2005、2010、2015 和 2018 年为研究年份。数据来源于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》和相关省份、自治区统计年鉴。一部分数据直接来源于上述年鉴,部分数据通过查找得到基础数据后计算得到。

1.2 水安全评价指标体系

DPSIR 模型在 20 世纪 90 年代由欧洲环境署(EEA)开发^[21],作为描述、沟通和分析社会与环境之间复杂系统相互关系的政策组织工具。该模型假设了一个因果关系链,人类活动中的驱动因素(D)可以对环境产生压力(P),从而导致状态的变化(S),产生健康的社会-生态影响(I),并激发对政策相应的响应(R),同时 R 也会对 D-P-S-I 链产生影响^[17]。基于此,本文在 DPSIR 模型的基础上,将西北五省区水安全评价指标体系分解为目标层、子系

统、指标层。在前人研究的基础^[22-25]上,基于科学性、代表性、合理性、数据可获取性的原则选取能够反映地区水安全问题的典型指标,从社会经济、自然资源、生态环境等能够反映西北五省区水安全现状的方面入手,构建水安全评价指标体系(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 单指标量化-多指标综合-多准则综合法
(1)单指标量化。采用分段隶属度函数来度量各个指标的子安全度^[22],数值介于 0~1。
数值越大越优型指标的子安全度计算公式为

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

表 1 西北五省区水安全综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive Evaluation Index System of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

目标层	子系统	指标层	量纲	不同省区的权重					指标类型
				陕西	甘肃	宁夏	青海	新疆	
水安全 (A)	驱动力 (B ₁)	GDP 增长率(C ₁)	%	0.39	0.20	0.26	0.37	0.25	↑
		人口自然增长率(C ₂)	%	0.30	0.59	0.36	0.24	0.43	↓
		单位面积水资源量(C ₃)	10 ⁴ m ³ · km ⁻²	0.31	0.21	0.38	0.38	0.32	↑
	压力 (B ₂)	万元工业产值用水量(C ₄)	m ³ · 万元 ⁻¹	0.17	0.19	0.18	0.20	0.16	↓
		农业用水率(C ₅)	%	0.26	0.23	0.20	0.22	0.27	↓
		生态补水率(C ₆)	%	0.16	0.18	0.19	0.18	0.20	↓
		人均生活用水量(C ₇)	L · (人 · d) ⁻¹	0.25	0.20	0.24	0.20	0.20	↓
		万元产值废水排放量(C ₈)	m ³ · 万元 ⁻¹	0.17	0.19	0.18	0.20	0.17	↓
	状态 (B ₃)	人均水资源量(C ₉)	m ³ · 人 ⁻¹	0.15	0.11	0.25	0.14	0.14	↑
		水资源利用率(C ₁₀)	%	0.14	0.10	0.14	0.27	0.19	↓
		水质监测断面达标率(C ₁₁)	%	0.17	0.28	0.11	0.10	0.20	↑
		人均 GDP(C ₁₂)	万元	0.19	0.16	0.18	0.20	0.19	↑
		恩格尔系数(C ₁₃)	%	0.23	0.23	0.20	0.19	0.11	↓
		森林植被覆盖率(C ₁₄)	%	0.12	0.12	0.11	0.10	0.16	↑
	影响 (B ₄)	城市化率(C ₁₅)	%	0.26	0.27	0.25	0.28	0.26	↓
		建成区绿化覆盖率(C ₁₆)	%	0.22	0.22	0.16	0.26	0.32	↑
		第三产业增长比重(C ₁₇)	%	0.32	0.30	0.43	0.25	0.24	↑
		用水普及率(C ₁₈)	%	0.22	0.21	0.15	0.21	0.18	↑
	响应 (B ₅)	城市污水处理率(C ₁₉)	%	0.27	0.25	0.28	0.24	0.23	↑
		工业固废综合利用率(C ₂₀)	%	0.25	0.27	0.26	0.32	0.25	↑
		水利环保及公共设施投资占比(C ₂₁)	%	0.21	0.22	0.21	0.21	0.25	↑
		万人在校大学生数(C ₂₂)	人	0.28	0.26	0.26	0.23	0.27	↑

注:“↑”代表数值越大越优型指标;“↓”代表数值越小越优型指标。

数值越小越优型指标的子安全度计算公式为

$$I_i=\begin{cases}1 & x_i<e_i \\ 0.8+0.2\frac{x_i-d_i}{e_i-d_i} & e_i\leqslant x_i<d_i \\ 0.6+0.2\frac{x_i-c_i}{d_i-c_i} & d_i\leqslant x_i<c_i \\ 0.3+0.3\frac{x_i-b_i}{c_i-b_i} & c_i\leqslant x_i<b_i \\ 0.3\frac{x_i-a_i}{b_i-a_i} & b_i\leqslant x_i<a_i \\ 0 & x_i\geqslant a_i\end{cases}\quad (2)$$

式中： x_i 、 I_i 分别为第 i 个指标的指标值和子安全度； a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 e_i 代表第 i 个指标的最差值、较差值、及格值、较优值和最优值，参考全国平均水平、省级发展规划、部分学者研究成果^[22,26-27]进行取值。

(2)多指标综合。采用熵值法确定各个指标和子系统权重。熵值法已被许多学者用于计算权重^[28-29]，此处不再赘述。5 个子系统的安全度计算公式为

$$T_j=\sum_{i=1}^{n_j}w_iI_i\quad (3)$$

式中： T_j 为第 j 个子系统的安全度； w_i 为利用熵值法计算所得的第 i 个指标权重； n_j 为第 j 个子系统指标数量； $j=1,2,3,4,5$ ，分别表示驱动力、压力、状态、影响、响应子系统。

(3)多准则综合。最终目标层水安全计算公式为

$$T=\beta_1T_1+\beta_2T_2+\beta_3T_3+\beta_4T_4+\beta_5T_5\quad (4)$$

式中： T 为区域水安全度； β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 分别为熵值法计算所得的驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统的权重。

基于评价结果将西北五省区水安全等级划分为 6 个等级^[22](表 2)。

表 2 西北五省区水安全等级划分

Table 2 Classification of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

序号	水安全等级	水安全度取值范围
1	安全	$0.83<T\leqslant 1.00$
2	较安全	$0.67<T\leqslant 0.83$
3	基本安全	$0.50<T\leqslant 0.67$
4	较不安全	$0.33<T\leqslant 0.50$
5	不安全	$0.17<T\leqslant 0.33$
6	严重不安全	$0.00\leqslant T\leqslant 0.17$

1.3.2 耦合协调度

耦合协调度模型能够反映不同子系统之间相互作用影响及这种作用中良性耦合程度的大小。DP-

SIR 模型中驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统之间相辅相成，可以采用耦合协调度模型定量测度这 5 个子系统之间协调发展水平。其计算公式为

$$C=5\times\left(\frac{T_1T_2T_3T_4T_5}{(T_1+T_2+T_3+T_4+T_5)^5}\right)^{1/5}\quad (5)$$

$$D=\sqrt{CT}\quad (6)$$

式中： C 为驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统之间的耦合协调度； D 为水安全耦合协调度。

依据前人研究结果^[30]对西北五省区水安全 5 个子系统耦合协调度进行等级划分(表 3)。

表 3 西北五省区 5 个子系统耦合协调度等级划分

Table 3 Classification of Coupling Coordination Degree of Five Subsystems in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

序号	耦合协调度取值区间	耦合协调度等级
1	$[0.0,0.1)$	极度失调
2	$[0.1,0.2)$	严重失调
3	$[0.2,0.3)$	中度失调
4	$[0.3,0.4)$	轻度失调
5	$[0.4,0.5)$	濒临失调
6	$[0.5,0.6)$	勉强协调
7	$[0.6,0.7)$	初级协调
8	$[0.7,0.8)$	中级协调
9	$[0.8,0.9)$	良好协调
10	$[0.9,1.0]$	优质协调

1.3.3 障碍度模型

在计算得到水安全结果并分析 5 个子系统之间的耦合协调度后，有必要进一步找到影响水安全的障碍因素。通过构建障碍度模型^[31]确定影响水安全的主要障碍因子。其计算公式为

$$P_i=1-x_i'\quad (7)$$

$$\alpha_i=\frac{P_iw_i}{\sum_{i=1}^n P_iw_i}\times 100\%\quad (8)$$

式中： P_i 为第 i 个指标偏离度； α_i 为第 i 个指标障碍度； x_i' 为第 i 个指标标准化后的指标值； n 为指标数量。

2 结果分析与讨论

2.1 水安全评价

2.1.1 综合评价

利用熵值法计算出各指标权重后，结合单指标量化-多指标综合-多准则综合法求得西北五省区水安全度及其等级划分(表 4)。总体来看，西北五省区水安全度呈现变好的趋势，但最大也仅处于基本安全状态，不同省区之间差异较大。陕西水安全在

表 4 西北五省区 2005、2010、2015、2018 年水安全综合评价结果

Table 4 Comprehensive Assessment of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang in 2005, 2010, 2015 and 2018

年份	陕西		甘肃		宁夏		青海		新疆	
	水安全度	等级	水安全度	等级	水安全度	等级	水安全度	等级	水安全度	等级
2005	0.40	较不安全	0.26	不安全	0.22	不安全	0.47	较不安全	0.34	较不安全
2010	0.46	较不安全	0.26	不安全	0.26	不安全	0.45	较不安全	0.36	较不安全
2015	0.53	基本安全	0.35	较不安全	0.30	不安全	0.52	基本安全	0.40	较不安全
2018	0.55	基本安全	0.45	较不安全	0.33	较不安全	0.52	基本安全	0.47	较不安全

2005 年和 2010 年处于较不安全状态,2015 年和 2018 年上升至基本安全状态,水安全度由 2005 年的 0.40 增加至 2018 年的0.55,得益于陕西近年来在重大水源工程建设方面取得了突破性进展;甘肃水安全在 2005 年和 2010 年处于不安全状态,水安全度都为 0.26,2015 年和 2018 年处于较不安全状态,水安全度增加较大,由最初的 0.26 上升至0.45,但随着城镇化和工业化快速推进,甘肃水安全将面临新的考验;青海水安全状态变化趋势与陕西类似,由 2005 年的较不安全状态至 2018 年达到基本安全状态,水安全度由最初的 0.47 上升至 0.52,作为中国重要生态安全屏障,平衡水安全与发展之间的关系将有利于水安全度的提升;新疆水安全状态在 2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年一直处于较不安全状态,水安全度虽有上升,但幅度不大,主要因为农业用水占比较高(约 90%),节水灌溉体制不完善,同时其自身环境的脆弱性导致水资源短缺,水安全保障能力较弱;宁夏水安全度在西北五省区中最差,2005 年、2010 年和 2015 年连续处于不安全状态,2018 年水安全状态虽然上升至较不安全状态,但其水安全度仅为 0.33,水资源占有量少,生态环境质量本底弱,同时面临着发展的压力,导致其水安全度较低。

2.1.2 子系统评价

对西北五省区水安全做出总体评价的基础上,进一步对驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统的安全度进行评价(图 1~5),并依据表 2 对其进行等级划分。对于驱动力子系统,除甘肃外,其他各省

区驱动力子系统的安全度均有一定幅度的下降,至 2018 年只有陕西驱动力子系统的安全度处于基本安全水平,其他省区则位于基本安全水平以下;压力子系统的安全度只有陕西处于变好状态,2018 年达到基本安全水平,其余各省区呈现波动下降,其中甘肃压力子系统的安全度最差,仅为 0.26,处于不安全水平;状态子系统的安全度各省区都呈现增加趋势,其中青海状态子系统的安全度从 2005 年的基本安全(0.62)到 2018 年达到了较安全(0.74),与此同时,宁夏状态子系统的安全度虽有所上升,但依旧处于不安全水平;影响子系统的安全度各省区较为接近,至 2018 年,除新疆位于基本安全水平外,其余各省区都处于较不安全水平;响应子系统的安全度各省区总体呈现上升趋势,其中陕西、甘肃和宁夏在 2018 年达到了基本安全水平,青海和新疆则位于较不安全水平。

2.2 水安全耦合协调度分析

利用式(5)、(6)计算得到西北五省区 2005 年、2010 年、2015 年、2018 年水安全耦合协调度,并依据表 3 对其进行等级划分(表 5)。总体来看,各省区水安全耦合协调度等级在逐年变好,这与西北五省区水安全度变化趋势相一致。从不同年份来看,2005 年至 2010 年,甘肃水安全耦合协调度等级由濒临失调(0.49)上升为勉强协调(0.50),新疆、青海、宁夏、陕西水安全耦合协调度等级在这 5 年未发生变化,分别处于勉强协调、初级协调、濒临失调、初级协调;2010 年至 2015 年,甘肃和青海水安全耦合协调度等级未发生变化,分别处于勉强协调和初级

表 5 西北五省区水安全耦合协调度演变结果

Table 5 Evolutions of Water Security Coupling Coordination Degree in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

年份	陕西		甘肃		宁夏		青海		新疆	
	耦合协调度	等级	耦合协调度	等级	耦合协调度	等级	耦合协调度	等级	耦合协调度	等级
2005	0.63	初级协调	0.49	濒临失调	0.46	濒临失调	0.63	初级协调	0.58	勉强协调
2010	0.67	初级协调	0.50	勉强协调	0.49	濒临失调	0.61	初级协调	0.58	勉强协调
2015	0.73	中级协调	0.59	勉强协调	0.54	勉强协调	0.69	初级协调	0.62	初级协调
2018	0.74	中级协调	0.67	初级协调	0.56	勉强协调	0.69	初级协调	0.65	初级协调

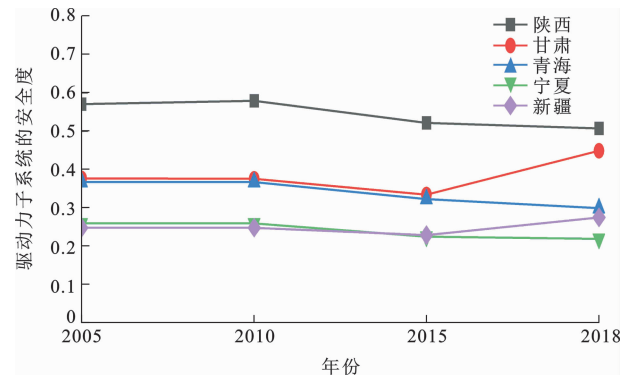


图 1 西北五省区驱动力子系统的安全度分布
Fig. 1 Distribution of Water Security of Driving Force Subsystem in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

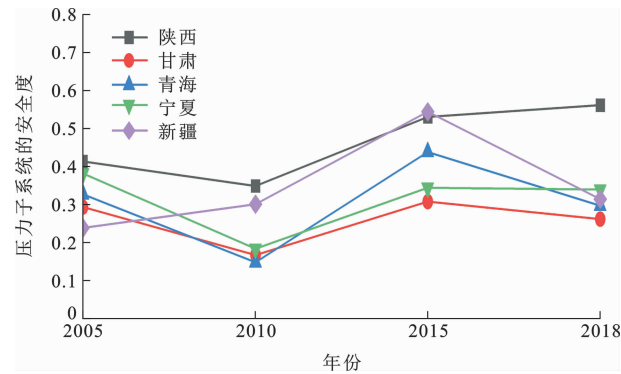


图 2 西北五省区压力子系统的安全度分布
Fig. 2 Distribution of Water Security of Pressure Subsystem in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

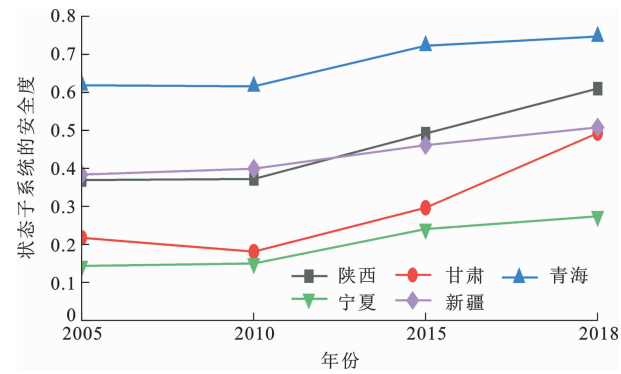


图 3 西北五省区状态子系统的安全度分布
Fig. 3 Distribution of Water Security of State Subsystem in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

协调,新疆水安全耦合协调度等级由勉强协调(0.58)上升为初级协调(0.62),宁夏水安全耦合协调度等级由濒临失调(0.49)上升为勉强协调(0.54),陕西水安全耦合协调度等级由初级协调(0.67)上升为中级协调(0.73);2015年至2018年,水安全耦合协调度等级未发生变化的省区有新疆、

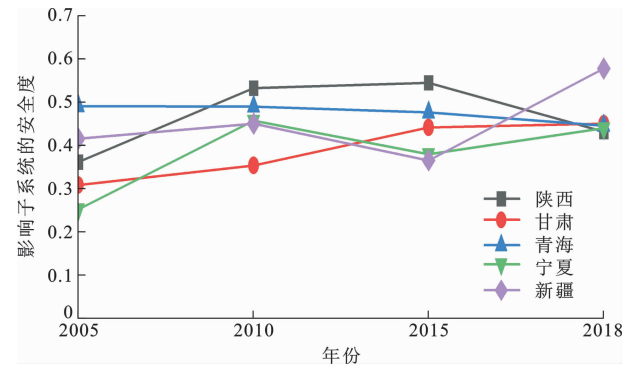


图 4 西北五省区影响子系统的安全度分布
Fig. 4 Distribution of Water Security of Impact Subsystem in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

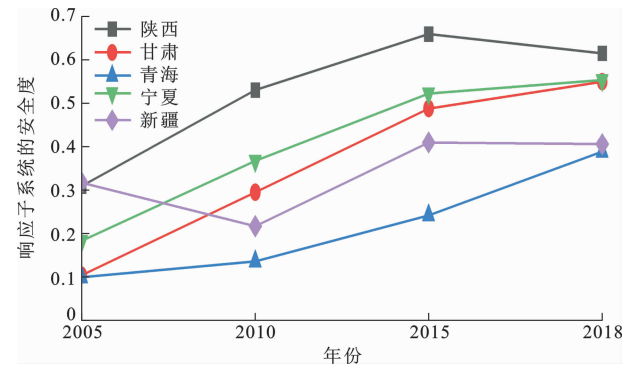


图 5 西北五省区响应子系统的安全度分布
Fig. 5 Distribution of Water Security of Response Subsystem in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang

青海、宁夏、陕西,甘肃水安全耦合协调度等级由勉强协调(0.59)上升为初级协调(0.67)。在整个研究时段(2005~2018年)内,西北五省区水安全耦合协调度等级都达到了勉强协调及以上,其中甘肃水安全耦合协调度等级变化最为明显,由最初的濒临失调(0.49)上升为初级协调(0.67),陕西水安全耦合协调度水平最高,达到了中级协调(0.74),新疆水安全耦合协调度等级由勉强协调(0.58)上升为初级协调(0.65),宁夏水安全耦合协调度等级最低,仅为勉强协调(0.56),青海水安全耦合协调度等级未发生转变,但其值由0.63上升至0.69,处于初级协调。

驱动力、压力、状态、影响、响应5个子系统之间相互依赖,任何一个子系统的的不稳定都将制约整个水安全系统的协调发展。同时,子系统间耦合协调度的发展趋势与水安全度的发展趋势较为一致,当水安全度增加时,对应的子系统间耦合协调度也随之上升。至2018年,除宁夏水安全耦合协调度等级为勉强协调外,其余各省区都位于初级协调及以上;相应地,2018年宁夏水安全度也仅为0.33,主要受

到驱动力子系统和状态子系统的安全度较差的影响。

2.3 水安全障碍因子分析

仅仅通过 5 个子系统间的协调与否无法判断制约水安全度的主导因素,因此,有必要进一步采用障碍度模型得到制约西北五省区水安全度的障碍因子。表 6 列出了西北五省区水安全度指标层排名前五的各障碍因子。总体来看,不同省区水安全度的制约因素各不相同,同一省区不同年份障碍因子也不相同,本文仅对 2018 年指标层因子的障碍度进行分析。2018 年,影响陕西水安全度的障碍因子主要有 GDP 增长率、第三产业增长比重、城市化率、人口自然增长率、水资源利用率,各因子的障碍度相差不大,累计障碍度达 61.6%;影响甘肃水安全度的障碍因子为第三产业增长比重、城市化率、GDP 增长率、农业用水率、生态补水率,其中第三产业增长比重、城市化率、GDP 增长率的障碍度较大,三者累计障碍度达 79.6%;影响青海水安全度的障碍因子有

GDP 增长率、城市化率、第三产业增长比重、农业用水率、用水普及率,累计障碍度为 94%,但主要因素为 GDP 增长率、城市化率、第三产业增长比重,三者累计障碍度为 77.5%;影响宁夏水安全度的障碍因子主要有第三产业增长比重、城市化率、GDP 增长率、工业固废综合利用率、生态补水率,障碍度分别为 36%、21.1%、21%、8.4%、5.2%。综合来看,2018 年,陕西、甘肃、宁夏、青海水安全度主要受到 GDP 增长率、第三产业增长比重、城市化率 3 个指标的影响。左其亭等研究认为区域社会经济发展受到水资源条件的制约,区域 GDP 增长率在一定程度上能够反映该区水资源支撑能力的强弱^[32]。第三产业对水资源消耗具有较小的压力,还具有保护水资源的作用,因此,第三产业比重是经济和水生态效益的双重体现^[33]。同时,过快的城市化会导致水资源压力倍增,协调好水资源与城市化之间的关系有利于达到“双赢”的目的^[34-35]。2018 年,影响新疆水安全度的障碍因子有水资源利用率、单位面积水资

表 6 西北五省区水安全度指标层障碍因子

Table 6 Barrier Factors of Index Layer for Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang																	
指标 排序	陕西								甘肃								
	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年		
	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	
1	C ₁₃	14.4	C ₁₃	22.4	C ₁	15.1	C ₁	14.4	C ₂	18.3	C ₂	18.6	C ₂	25.3	C ₁₇	29.5	
2	C ₁₂	12.1	C ₁₁	16.5	C ₉	12.5	C ₁₇	13.4	C ₁₁	17.6	C ₁₁	17.9	C ₁₁	10.7	C ₁₅	26.6	
3	C ₁₁	10.2	C ₁₂	11.7	C ₁₀	11.9	C ₁₅	12.0	C ₁₃	11.6	C ₁₃	14.1	C ₃	9.1	C ₁	23.5	
4	C ₁₈	7.6	C ₇	7.0	C ₃	11.8	C ₂	11.5	C ₁₂	9.4	C ₁₂	6.1	C ₉	8.7	C ₅	11.9	
5	C ₁₇	6.6	C ₁₅	6.1	C ₁₅	9.6	C ₁₀	10.3	C ₁₈	6.2	C ₁₇	5.9	C ₁₇	7.7	C ₆	3.5	
指标 排序	青海								宁夏								
	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年		
	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	
1	C ₁₂	15.0	C ₁₀	18.4	C ₁₀	22.8	C ₁	29.8	C ₉	11.6	C ₉	16.7	C ₉	18.8	C ₁₇	36.0	
2	C ₁₃	9.3	C ₁₃	14.7	C ₃	15.2	C ₁₅	25.0	C ₃	10.8	C ₃	14.3	C ₁₇	17.9	C ₁₅	21.1	
3	C ₁₀	9.1	C ₁₂	10.4	C ₉	12.0	C ₁₇	22.7	C ₂	10.1	C ₁₃	11.7	C ₃	14.4	C ₁	21.0	
4	C ₁₁	8.4	C ₃	9.2	C ₁₅	9.0	C ₅	9.6	C ₁₃	9.2	C ₁₁	8.4	C ₁	9.3	C ₂₀	8.4	
5	C ₁₆	7.3	C ₉	5.9	C ₁₇	7.4	C ₁₈	6.9	C ₁₇	8.6	C ₁₂	7.9	C ₁₅	9.2	C ₆	5.2	
指标 排序	新疆																
	2005 年			2010 年			2015 年			2018 年							
	障碍因子		障碍度/%	障碍因子		障碍度/%	障碍因子		障碍度/%	障碍因子		障碍度/%	障碍因子		障碍度/%		
1	C ₁₁		12.2	C ₁₁		16.9	C ₁₀		13.3	C ₁₀				14.9			
2	C ₂		11.7	C ₂		15.9	C ₂		11.5	C ₃				13.1			
3	C ₁₆		10.0	C ₁₂		10.7	C ₁₁		10.7	C ₁₅				12.9			
4	C ₁₂		9.8	C ₅		7.1	C ₁₅		9.6	C ₁₇				11.3			
5	C ₁₄		7.5	C ₆		6.3	C ₃		9.5	C ₉				11.2			

源量、城市化率、第三产业增长比重、人均水资源量,障碍度分别为 14.9%、13.1%、12.9%、11.3%、11.2%,累计障碍度为 63.4%。新疆人均水资源量约为全国平均的 2 倍,但单位面积水资源量低,同时较高的水资源开发利用率制约了水安全度向好发展。

3 结 语

(1)总体来看,西北五省区水安全度呈现变好的趋势。至 2018 年,陕西和青海水安全处于基本安全水平,甘肃、宁夏、新疆水安全处于较不安全水平。

(2)水安全子系统的耦合协调度与水安全变化相一致。2018 年,陕西水安全子系统处于中级协调,甘肃、青海、新疆水安全子系统处于初级协调,宁夏水安全子系统处于勉强协调。

(3)GDP 增长率、第三产业增长比重、城市化率是影响陕西、甘肃、宁夏、青海水安全度现状的主要障碍因子,新疆水安全度主要受水资源利用率、单位面积水资源量、城市化率的影响。

总之,西北五省区作为中国重要的能源基地,在新形势下应该充分利用其丰富的绿色能源,调整能源消费结构,发展绿色经济,同时应该选择耗水少、耗电低、技术高的新型产业实现经济快速发展,开发利用西北丰富的土地资源,发展高标准、高品质生态农业,理性对待城市化,合理控制主城区人口,有序引导人口向节点城市汇聚,这是西北地区未来发展的科学选择。与此同时,针对水资源问题,有必要实施相关工程措施通过远距离调水来缓解和改善西北地区水资源匮乏和分布不均的问题。

李 鹏:西安地质调查中心是自然资源部中国地质调查局直属的公益一类事业单位,主要承担西北地区地质调查、科技创新、科学普及和相关综合研究工作。我曾与西安地质调查中心很多专家在陕北榆林荒漠化区综合地质调查与评价以及秦岭、宁东矿产资源集中开采区地质环境调查等项目展开了深度合作。在交流过程中,对该中心工作的业务领域、工作特点以及工作成就有更深入的了解,对该中心坚持“支撑国家、服务社会、科技创新、绿色发展、保障资源、保护生态”的管理方针和积极践行“责任、创新、合作、奉献、清廉”新时代地质文化有了更加深刻的认识,对自己的科研工作也起到了极大的帮助和促进作用。值此西安地质调查中心组建六十周年之际,衷心祝愿西安地质调查中心事业进步,人才辈出!在基础调查、科学研究、服务社会等方面取得更

大的成就,早日建成世界一流新型大区地质调查机构!

参 考 文 献 :

References :

- [1] KOSOLAPOVA N A, MATVEEVA L G, NIKITAEVA A Y, et al. Modeling Resource Basis for Social and Economic Development Strategies; Water Resource Case[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 438-446.
- [2] MARCAL J, ANTIZAR-LADISLAO B, HOFMAN J. Addressing Water Security; An Overview[J]. *Sustainability*, 2021, 13(24): 13702.
- [3] 吴季松. 海牙国际水资源会议与国际水资源政策动向[J]. *世界环境*, 2000(3): 37-38.
WU Ji-song. Second World Water Forum and Trend of International Water Resources Policy Framework[J]. *World Environment*, 2000(3): 37-38.
- [4] GU S Z, JENKINS A, GAO S J, et al. Ensuring Water Resource Security in China; the Need for Advances in Evidence-based Policy to Support Sustainable Management[J]. *Environmental Science and Policy*, 2017, 75: 65-69.
- [5] 邢 霞, 修长百, 刘玉春. 基于水足迹理论的黄河流域水安全评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(2): 250-258.
XING Xia, XIU Chang-bai, LIU Yu-chun. Water Security Assessment of Yellow River Basin Based on Water Footprint Theory[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(2): 250-258.
- [6] BORJI M, MOGHADDAM NIA A, MALEKIAN A, et al. Comprehensive Evaluation of Groundwater Resources Based on DPSIR Conceptual Framework[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(8): 1-13.
- [7] ZHOU F, SU W C, ZHANG F T. Influencing Indicators and Quantitative Assessment of Water Resources Security in Karst Region Based on PSER Model: The Case of Guizhou[J]. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5671.
- [8] GERLAK A K, HOUSE-PETERS L, VARADY R G, et al. Water Security; A Review of Place-based Research[J]. *Environmental Science and Policy*, 2018, 82: 79-89.
- [9] 陈 丽, 周 宏. 基于模糊综合评价和主成分分析法的岩溶流域水资源承载力评价[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(6): 159-173.
CHEN Li, ZHOU Hong. Carrying Capacity Evalua-

- tion of Water Resources in Karst Basin Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Principal Component Analysis[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 159-173.
- [10] 李治军,董智,陈末,等. 基于模糊分析法的合肥市水资源承载力评价[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 44-46.
LI Zhi-jun, DONG Zhi, CHEN Mo, et al. Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Hefei City Based on Fuzzy Analysis Method[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 44-46.
- [11] 尚文绣,尚奔,严登明,等. 基于模糊逻辑的黄河流域水安全综合评价方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 369-378.
SHANG Wen-xiu, SHANG Yi, YAN Deng-ming, et al. Comprehensive Assessment Method of Water Security in Yellow River Basin Based on Fuzzy Logic[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 369-378.
- [12] 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.
ZHANG Xiu-yu, QIN Tian, SUN Han-fang, et al. Comprehensive Evaluation of Water Safety in Zhengzhou City Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Yellow River, 2020, 42(6): 42-45.
- [13] YIN B L, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Sensitivity Assessment and Simulation of Water Resource Security in Karst Areas Within the Context of Hydroclimate Change[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258(10): 120994.
- [14] SANDOVAL-SOLIS S, ORTIZ PARTIDA J P, FLOYD L. Multi-objective Water Planning in a Poor Water Data Region: Aragvi River Basin[J]. Sustainability, 2022, 14(6): 36-49.
- [15] 刘东平. 基于投影寻踪的水资源系统分析评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
LIU Dong-ping. Analysis and Evaluation of Water Resources System Based on Projection Pursuit[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [16] BAO C, CHEN X J. The Driving Effects of Urbanization on Economic Growth and Water Use Change in China: A Provincial-level Analysis in 1997-2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 530-544.
- [17] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301.
XIA Jun, SHI Wei. Perspective on Water Security Issue of Changing Environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301.
- [18] 邓铭江. 破解内陆干旱区水资源紧缺问题的关键举措: 新疆干旱区水问题发展趋势与调控策略[J]. 中国水利, 2018(6): 14-17.
DENG Ming-jiang. National Water Conservation Action is a Key Measure for Alleviating Water Shortage in Inland Dry Areas: A Study on the Development Trend of Water Issues in the Dry Areas of Xinjiang Uyghur Autonomous Region and Its Allocation and Regulation Strategy[J]. China Water Resources, 2018(6): 14-17.
- [19] 夏军,刘柏君,程丹东. 黄河水安全与流域高质量发展思路探讨[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 11-16.
XIA Jun, LIU Bai-jun, CHENG Dan-dong. Discussion on Water Security and High-quality Development of Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(10): 11-16.
- [20] 牛玉国,王煜,李永强,等. 黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障布局 and 措施研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(8): 1-6.
NIU Yu-guo, WANG Yu, LI Yong-qiang, et al. Water Security Layout for the Ecological Protection and High-quality Development of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(8): 1-6.
- [21] EVERARD M, JOHNSTON P, SANTILLO D, et al. The Role of Ecosystems in Mitigation and Management of Covid-19 and Other Zoonoses[J]. Environmental Science and Policy, 2020, 111: 7-17.
- [22] 王浩. 变化环境下流域水资源评价方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
WANG Hao. Evaluation Method of Watershed Water Resources Under Changing Environment[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009.
- [23] 邓捷铭,贾绍凤. 区域水安全评价指标体系构建与应用[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 48-56.
DENG Jie-ming, JIA Shao-feng. Indicators System Construction and Application of Regional Water Security[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 48-56.
- [24] 张洋,李鹏,杨志,等. 基于 DPSIR 模型的甘肃省 2000~2018 年水安全评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 127-132.
ZHANG Yang, LI Peng, YANG Zhi, et al. Water Security Evaluation of Gansu Province During 2000-2018 Based on DPSIR Model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 127-132.
- [25] 陈洋波,陈俊合,李长兴,等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 98-103.

- CHEN Yang-bo, CHEN Jun-he, LI Chang-xing, et al. Indicators for Water Resources Carrying Capacity Assessment Based on Driving Forces-pressure-state-impact-response Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 98-103.
- [26] 张修宇, 秦 天, 杨淇翔, 等. 黄河下游引黄灌区水安全评价方法及应用[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 18-24.
- ZHANG Xiu-yu, QIN Tian, YANG Qi-xiang, et al. Method of Evaluating Safety for Water Usage and Its Application to Water Use in Irrigation Districts in the Lower Reach of the Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 18-24.
- [27] 李奕霖. 广东省水安全评价及保障模式研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- LI Yi-lin. Assessment and Safeguard Model of Water Security in Guangdong Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [28] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58.
- ZHANG Zhi-jun, CHEN Fu-long, LONG Ai-hua, et al. Xinjiang Water Resources Security Evaluation Based on Fuzzy Set Pair Analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58.
- [29] 刘艺文, 王洪涛. 基于灰水足迹和熵值法的苏锡常地区水敏感性行业识别[J]. 环境科学学报, 2020, 40(8): 3053-3061.
- LIU Yi-wen, WANG Hong-tao. Identification of Water-sensitive Industries in Su-Xi-Chang Region Based on Greywater Footprint and Entropy Method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(8): 3053-3061.
- [30] 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.
- SUN Bin, XU Wei, XUE Jian-chun, et al. Prediction of Coupling and Coordination Between Urbanization and Eco-environment of Urban Agglomerations in Yellow River Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(5): 887-896.
- [31] 陈正发, 龚爱民, 张刘东, 等. 基于质量评价的省域尺度坡耕地质量调控体系构建[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 136-145.
- CHEN Zheng-fa, GONG Ai-min, ZHANG Liu-dong, et al. Construction of the Quality Regulation System for Provincial Scale Slope Farmland Based on Quality Evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 136-145.
- [32] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 29-38.
- ZUO Qi-ting, ZHANG Zhi-zhuo, MA Jun-xia. Relationship Between Water Resource Utilization Level and Socio-economic Development in the Yellow River Basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(10): 29-38.
- [33] 张丽娜, 徐 洁, 庞庆华, 等. 水资源与产业结构高级化的适配度时空差异及动态演变[J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 2113-2124.
- ZHANG Li-na, XU Jie, PANG Qing-hua, et al. Spatio-temporal Differences and Dynamic Evolution of the Adaptabilities Between Water Resources and Advanced Industrial Structure[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(8): 2113-2124.
- [34] 钞锦龙, 李乐乐, 杨 朔, 等. 汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 487-496.
- CHAO Jin-long, LI Le-le, YANG Shuo, et al. Coupling and Coordination Relation Between Urbanization and Water Resources in the Fenhe River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 487-496.
- [35] 王 欣, 侯效灵, 侯保灯, 等. 基于 DPSIRM 模型的城市化进程与水安全耦合关系分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 50-57.
- WANG Xin, HOU Xiao-ling, HOU Bao-deng, et al. Analysis of the Coupling Relationship Between Urbanization Process and Water Security Based on DPSIRM Model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2021, 42(2): 50-57.