

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0104

范玲, 王会肖, 刘昌明, 等. 基于压力-状态-响应模型的新疆水资源脆弱性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1052-1064. FAN L, WANG H X, LIU C M, et al. Vulnerability assessment of water resources in Xinjiang based on pressure-state-response model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1052-1064. (in Chinese)

基于压力-状态-响应模型的新疆水资源脆弱性评价

范玲¹, 王会肖¹, 刘昌明², 隋官航¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 鉴于脆弱性要素(暴露度、敏感性和适应性)与压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型结构有很好的对应关系, 基于 PSR 模型开展新疆维吾尔自治区 2010—2019 年的水资源脆弱性评价。筛选人均用水量等 25 个评价指标, 构建目标层-准则层-指标层评价体系并利用熵权法计算指标权重; 将水资源脆弱性划分为不脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极脆弱 5 级, 利用集对分析法和置信度准则计算得到 2010—2019 年的水资源脆弱性水平; 将指标层和准则层脆弱性与系统综合脆弱性进行对比, 分析各指标与准则层脆弱性水平和变化趋势与系统脆弱性的关系, 探究影响水资源系统脆弱性的主要原因, 成果可为新疆水资源管理提供参考。

关键词: 水资源脆弱性; PSR 模型; 评价指标体系; 熵权法; 集对分析法

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



2018 年联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在《全球升温 1.5 °C 特别报告》中指出人类活动已造成全球气温相对工业化前升高约 1.0 °C, 并可能在 2030—2050 年达到 1.5 °C^[1], 而我国 1951—2020 年地表平均升温达到了 0.26 °C/(10 a)^[2]。水资源系统是受全球变暖影响最为明显的系统之一。

水资源脆弱性指水资源系统在水文地质、气候变化、经济发展等因素综合作用下, 系统的稳定性被破坏, 状态和结构发生变化, 并导致其服务或承载对象受到一定损失^[3]。脆弱性要素通常包含暴露度、敏感性和适应性 3 个方面^[4-5]。水资源脆弱性不仅研究水资源本身的变化情况, 还分析在各种外界因素作用下, 水资源的供需水平、承载力和水安全状况, 是进行区域水资源评价, 对未来经济社会发展具有指导意义的综合指标。

在进行水资源脆弱性评价时, 张蕊^[6]、黄奎等^[7]

将地表水资源脆弱性分解为自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性 3 部分; 钟姗姗等^[8]将流域水资源脆弱性分为资源脆弱性、环境脆弱性和社会经济脆弱性。也有学者选择具有物理机制的概念模型构建指标体系, 如杨大方等^[9]、杨法暄等^[10]分别采用压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型和在此基础上发展的驱动力-压力-状态-影响-响应(driving forces-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型分别构建了贵州省和西安市的水资源脆弱性评价指标体系。PSR 模型是 20 世纪 80 年代末经济合作与发展组织和联合国环境规划署共同开发的模型^[11-12], 结合水资源脆弱性概念, 在指标体系构建中: 压力可以理解为外部因素对水资源系统产生的干扰胁迫程度, 即暴露度, 包括气候变化和人类活动两方面; 状态可理解为水资源系统面对干扰容易受影响的程度和由此产生的社会问题, 即敏感性; 响应主要指人类为避免水资源危机采取的政策和

收稿日期: 2022-06-17 修回日期: 2022-09-10 网络出版时间: 2022-11-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221118.1141.006.html>

基金项目: 中国科学院特别专项“新疆可持续发展研究”

作者简介: 范玲(1997—), 女, 重庆人, 主要从事水文水资源与可持续发展研究。E-mail: 1744007922@qq.com

通信作者: 王会肖(1966—), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水文水资源研究。E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

措施,即适应性^[9,12-13]。PSR 概念模型能清楚地表征研究目标和影响因素间的因果关系^[14],即外界干扰对水资源造成的压力导致水资源状态改变,人类为减少这种改变带来的损失而做出响应。因此,依据 PSR 模型构建评价指标体系。

水资源脆弱性评价方法主要有综合权重法^[15]、层次分析法^[16]、模糊综合评价法^[17]等。这些方法都能从确定性的角度给出水资源的脆弱性水平,但无法解决研究过程中的不确定性问题^[18]。集对分析法是赵克勤^[19]提出的一种系统分析方法,该方法能有效处理系统间和系统内部的不确定性关系,因此很多学者将集对分析理论用于研究水资源问题^[20]。如:张礼兵等^[21]从水资源供需角度定义单元供需均衡度并结合水资源空间均衡评价等级标准,构建了渭河灌区水资源系统空间均衡状态的七元联系数;刘锐等^[22]采用集对分析法和障碍度模型分析了西北 6 省的耕地生态安全水平和主要影响因素;张倩^[23]利用模糊综合评价法、集对分析法以及投影寻踪模型分别对贵阳市水资源脆弱性作了分析,结果表明集对分析法更适合喀斯特地区的脆弱性评价。新疆维吾尔自治区(简称新疆)是我国对气候变化最敏感的区域之一,自 21 世纪初施雅风等^[24]提出新疆出现“暖湿化”转型信号以来,许多学者^[25-26]对新疆的气温、降水和径流变化等开展了研究,但从结合自然资源和社会发展角度评估新疆水资源现状的相关研究较少。因此,本文基于 PSR 模型构建新疆水资源脆弱性评价指标体系,以熵权法计算其指标权重值,最后根据集对分析法评估区域 2010—2019 年水资源脆弱性,对新疆近 10 a 的水资源脆弱性水平给出较为全面的评价结果。

1 研究区概况

新疆位于亚欧大陆腹地,东经 73°46′~96°23′,北纬 34°25′~49°50′。面积约 166 万 km²,地形呈“三山夹两盆”,“三山”从北至南分别为阿尔泰山、天山和昆仑山,“两盆”指准噶尔盆地和塔里木盆地^[27]。地貌类型为山地-绿洲-荒漠相间分布,其中的人工绿洲聚集了全疆 95% 的人口和 80% 的经济,形成了典型的绿洲经济^[28]。区域农业是典型的灌溉农业,从地区用水量来看,2016 年除石河子、乌鲁木齐、克拉玛依和哈密外,其余地区灌溉用水量均占用水总量的 90% 以上^[29]。

区域属温带大陆性气候,干燥少雨,2020 年平

均温度 8.7 °C,1961—2019 年年平均气温上升速率 0.30 °C/(10 a),年降水量上升趋势为 9.6 mm/(10 a)^[30]。水汽主要为纬向西风环流带来的大西洋水汽,多年平均降水量 153 mm,多年平均水资源量 834.9 亿 m³^[28],年平均潜在蒸散量 1512 mm^[31]。水系“向心”分布,形成 570 多条河流和 100 多个湖泊^[28],较大的有塔里木河、伊犁河、额尔齐斯河、玛纳斯河等。降水时空分布不均,夏季降水最多,春季和秋季次之,冬季最少;天山以北多于天山以南,山地多于平原^[32-33]。

2 研数据及方法

2.1 数据来源

所用经济社会和气象数据主要来源于 2011—2021 年《新疆统计年鉴》和国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>),自然环境和水文数据主要来源于 2010—2020 年《新疆维吾尔自治区生态环境状况公报》和 2010—2019 年《新疆维吾尔自治区水资源公报》,部分不能直接获取的数据通过其他数据计算得到。

2.2 构建评价指标体系

根据 PSR 模型特征,从压力-状态-响应 3 个层面构建指标体系,其中,压力层包含气候变化型指标和人类活动型指标,状态层包含自然资源和人类社会两方面,响应层则主要反映采取的应对措施。为全面合理地选出评价指标,在中国知网中搜索国内水资源脆弱性研究相关文献资料,整理得到 100 个评价指标,通过词频分析得到出现频率靠前的 20 个指标,包括人均 GDP、年降水量、水资源开发利用率、产水模数和人口自然增长率等。结合新疆区域特征和资料可获取性,以及指标选取的全面性、代表性、可操作性、动态性等原则,最终确定了以新疆水资源脆弱性评价为目标层,压力-状态-响应为准则层,共含 25 个指标的评价体系,见表 1。将指标分为正向指标(指标值越大,脆弱性水平越高)和逆向指标(指标值越大,脆弱性水平越低)两类^[34]。

2.3 指标分级标准

在进行水资源脆弱性计算前,需要先确定脆弱性评价标准,但目前国内对水资源脆弱性还没有统一标准,本文参考前人研究^[35]将水资源脆弱性水平分为 5 个等级:不脆弱(I)、轻度脆弱(II)、中度脆弱(III)、重度脆弱(IV)和极脆弱(V),将各个指标数据值等距离散化后调整得到不同脆弱等级评价标准,见表 2。

表 1 新疆水资源脆弱性评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water resources vulnerability in Xinjiang

准则层	指标层	计算公式	属性
气候变化	年平均气温距平百分比绝对值 $P_1/\%$	$ \text{气温距平}/\text{多年平均气温} $	正
	年降水量距平百分比绝对值 $P_2/\%$	$ \text{降水量距平}/\text{多年平均降水量} $	正
压力	人口自然增长率 $P_3/\%$		正
	GDP增长率 $P_4/\%$		正
	人均用水量 P_5/m^3	用水总量/总人口	正
	万元工业增加值用水量 P_6/m^3	工业用水总量/工业增加值	正
	万元GDP用水量 P_7/m^3	用水总量/地区生产总值	正
	废水排放总量 $P_8/\text{亿t}$		正
	单位农田面积化肥使用量 $P_9/[\text{t}\cdot(10^3\text{hm}^2)^{-1}]$	化肥使用量/农作物播种面积	正
	能源消费总量 $P_{10}/\text{万t标准煤}$		正
自然资源	产水系数 S_1	水资源总量/降水总量	逆
	产水模数 $S_2/(\text{万m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	水资源总量/流域面积	逆
	年平均径流距平百分比绝对值 $S_3/\%$	$ \text{径流深距平}/\text{多年平均径流深} $	正
	全区河流 I 至 III 类优良断面水质占比 $S_4/\%$		逆
	森林覆盖率 $S_5/\%$		逆
	水资源开发利用效率 $S_6/\%$	总用水量/水资源总量	正
人类社会	人均水资源量 S_7/m^3	水资源总量/总人口	逆
	自然灾害直接经济损失 $S_8/\text{亿元}$		正
	人均GDP $R_1/\text{元}$	地区生产总值/总人口	逆
响应	生活污水和工业废水治理总投资 $R_2/\text{亿元}$		逆
	生态环境用水量 $R_3/\text{亿m}^3$		逆
	节灌率 $R_4/\%$	节水灌溉面积/灌溉面积	逆
	环保系统机构数 $R_5/\text{个}$		逆
	水利工程调蓄能力 $R_6/\%$	地表水供水量/水资源总量	逆
	造林总面积 $R_7/10^3\text{hm}^2$		逆

2.4 确定指标权重

指标的权重计算常用的方法有层次分析法、主成分法、熵权法等,其中熵权法可以避免人为判断的主观性,客观性较强且公式简单,应用性广^[36]。在指标数据矩阵 $X = \{x_{ij}\}_{n \times m}$ 中,数据离散程度越大,则信息熵越小,权重值越大;反之权重值越小。熵权法具体计算步骤如下:

指标标准化:不同指标间量纲不同,需要统一将指标标准化^[9]。正向指标和逆向指标对应标准化公式分别为

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

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

式中: $r_{ij}(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m)$ 为标准化

后的指标值; x_{ij} 表示在第 i 个评价对象(年份)中第 j 个指标原始值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别对应 j 指标的最大、最小值。

第 j 项指标的熵值 H_j 为

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

式中, f_{ij} 为第 j 项指标在第 i 个年份所占权重,表达式为

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

当 $r_{ij} = 0$, $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义,因此将公式(4)修正^[37]为

$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + r_{ij})} \quad (5)$$

表2 指标脆弱性评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria of each index's vulnerability

指标	评价等级				
	I	II	III	IV	V
年平均气温距平百分比绝对值 $P_1 / \%$	≤ 2.10	(2.10,4.00]	(4.00,5.90]	(5.90,7.80]	>7.80
年降水量距平百分比绝对值 $P_2 / \%$	≤ 0.50	(0.50,8.50]	(8.50,16.50]	(16.50,24.50]	>24.50
人口自然增长率 $P_3 / \%$	≤ 3.50	(3.50,6.50]	(6.50,9.00]	(9.00,11.50]	>11.50
GDP增长率 $P_4 / \%$	≤ 6.00	(6.00,8.00]	(8.00,10.00]	(10.00,12.00]	>12.00
人均用水量 P_5 / m^3	≤ 2300	(2300,2400]	(2400,2600]	(2600,2700]	>2700
万元工业增加值用水量 P_6 / m^3	≤ 30	(30,38]	(38,45]	(45,52]	>52
万元GDP用水量 P_7 / m^3	≤ 400	(400,600]	(600,800]	(800,1000]	>1000
废水排放总量 $P_8 / \text{亿t}$	≤ 7.50	(7.50,8.50]	(8.50,9.50]	(9.50,10.50]	>10.50
单位农田面积化肥使用量 $P_9 / [\text{t} \cdot (10^3 \text{hm}^2)^{-1}]$	≤ 360	(360,380]	(380,400]	(400,420]	>420
能源消费总量 $P_{10} / \text{万吨标准煤}$	≤ 8000	(8000,12000]	(12000,15000]	(15000,19000]	>19000
产水系数 S_1	≥ 0.38	[0.35,0.38)	[0.32,0.35)	[0.29,0.32)	<0.29
产水模数 $S_2 / (\text{万m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	≥ 6.80	[6.00,6.80)	[5.20,6.00)	[4.40,5.20)	<4.40
年平均径流距平百分比绝对值 $S_3 / \%$	≤ 1.00	(1.00,8.00]	(8.00,15.00]	(15.00,22.00]	>22.00
全区河流 I~III类优良断面水质占比 $S_4 / \%$	≥ 99	[97,99)	[94,97)	[92,94)	<92
森林覆盖率 $S_5 / \%$	≥ 5.00	[4.70,5.00)	[4.40,4.70)	[4.10,4.40)	<4.10
水资源开发利用效率 $S_6 / \%$	≤ 50.00	(50.00,60.00]	(60.00,70.00]	(70.00,80.00]	>80.00
人均水资源量 S_7 / m^3	≥ 5200	[4500,5200)	[3800,4500)	[3200,3800)	<3200
自然灾害直接经济损失 $S_8 / \text{亿元}$	≤ 40	(40,80]	(80,125]	(125,170]	>170
人均GDP $R_1 / \text{元}$	≥ 54000	[44000,54000)	[34000,44000)	[24000,34000)	<24000
生活污水和工业废水治理总投资 $R_2 / \text{亿元}$	≥ 40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	<10
生态环境用水量 $R_3 / \text{亿m}^3$	≥ 35	[25,35)	[15,25)	[5,15)	<5
节灌率 $R_4 / \%$	≥ 60	[55,60)	[50,55)	[45,50)	<45
环保系统机构数 $R_5 / \text{个}$	≥ 450	[400,450)	[350,400)	[300,350)	<300
水利工程调蓄能力 $R_6 / \%$	≥ 65	[55,65)	[45,55)	[35,45)	<35
造林总面积 $R_7 / (10^3 \text{hm}^2)$	≥ 250	[200,250)	[150,200)	[100,150)	<100

指标权重 w_j 表达式为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (6)$$

式中: $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

2.5 水资源脆弱性评估方法

在水资源脆弱性评价方法中,集对分析法因能有效处理系统内和系统间的不确定性问题而得到广泛应用,根据需要还能对计算公式进行扩展以满足研究问题的复杂和深入程度。因此,采用该方法进行水资源脆弱性计算。

2.5.1 集对分析法原理

设刻画一个对象 W 同时需要两个集合 A 、 B , 记 $H = (A, B)$, 则 H 为一个集对。设两个集合的特性共有 N 个, 其中表现为集合共有的特性个数为 S , 表

现为集合对立的特性个数为 P , 既不共有也不对立的特性为 $F = N - S - P$ 个, 集对分析就是用联系度 μ 将这两个集合具有的特性做同异反的分析并定量描述^[38]。联系度表达式为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}I + \frac{P}{N}J \quad (7)$$

令 $a = \frac{S}{N}$, $b = \frac{F}{N}$, $c = \frac{P}{N}$, $a + b + c = 1$, 则得到

$$\mu = a + bI + cJ \quad (8)$$

式中: a 、 b 、 c 为集合 A 、 B 的同一度、差异度和对立度; I 为差异度系数, 取值 $[-1, 1]$; J 为对立度系数, 恒取值 -1 。当联系度取具体数值时称联系系数。

式(8)为三元联系度, 对公式的不确定项 bI 进行扩展可得到 k 元联系度^[22], 表达式为

$$\mu = a + b_1I_1 + b_2I_2 + \cdots + b_{k-2}I_{k-2} + cJ \quad (9)$$

2.5.2 水资源脆弱性计算

集对分析法计算水资源脆弱性,实质是比较评价指标与评价等级间的关联度,从而确定评价对象所属的脆弱性等级^[35]。设评价指标为集合 $X=\{x_{ij}\}_{n \times m}$, n 为年份, m 为评价指标数,评价等级标准

为集合 $Z=\{z_k\}, k=1, 2, \dots, 5$, 集对 $H=(X, Z)$, 则第 i 年的指标 j 对应于评价等级 k 的单指标联系度为

$$\mu_{ij} = a_j + b_{j,1}I_1 + b_{j,2}I_2 + b_{j,3}I_3 + c_jJ \quad (10)$$

对于正向指标^[39]:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J, x_{ij} \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2}{2} + \frac{s_2 - s_1}{2x_{ij} - 2s_1} I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J, s_1 < x_{ij} \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3}{2} + \frac{s_2 - s_1}{2x_{ij} - s_1 - s_2} I_1 + \frac{s_3 - s_1}{2x_{ij} - s_1 - s_2} I_2 + 0I_3 + 0J, \frac{s_1 + s_2}{2} < x_{ij} \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0I_1 + \frac{s_3 + s_4}{2} + \frac{s_3 - s_1}{2x_{ij} - s_2 - s_3} I_2 + \frac{s_4 - s_2}{2x_{ij} - s_2 - s_3} I_3 + 0J, \frac{s_2 + s_3}{2} < x_{ij} \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \frac{s_4 - s_2}{2x_{ij} - 2s_4} I_3 + \frac{s_3 + s_4}{2} J, \frac{s_3 + s_4}{2} < x_{ij} \leq s_4 \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + J, x_{ij} > s_4 \end{cases} \quad (11)$$

对于逆向指标:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J, x_{ij} \geq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2}{2} + \frac{2s_1 - 2x_{ij}}{2x_{ij} - s_1 - s_2} I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J, \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x_{ij} < s_1 \\ 0 + \frac{s_1 + s_2}{2} + \frac{s_1 - s_2}{2x_{ij} - s_2 - s_3} I_1 + \frac{s_1 + s_2 - 2x_{ij}}{2x_{ij} - s_2 - s_3} I_2 + 0I_3 + 0J, \frac{s_2 + s_3}{2} \leq x_{ij} < \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + 0I_1 + \frac{s_3 + s_4}{2} + \frac{s_1 - s_3}{2x_{ij} - s_3 - s_4} I_2 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_{ij}}{2x_{ij} - s_3 - s_4} I_3 + 0J, \frac{s_3 + s_4}{2} \leq x_{ij} < \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \frac{s_3 + s_4}{2} J, s_4 \leq x_{ij} < \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + J, x_{ij} < s_4 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $s_1 - s_4$ 为指标评价标准临界值。

那么,第 i 年的综合联系度为

$$\mu_i = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j a_j + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,1} I_1 + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,2} I_2 + \sum_{j=1}^m w_j b_{j,3} I_3 + \sum_{j=1}^m w_j c_j J \quad (13)$$

令 $f_1 = \sum_{j=1}^m w_j a_j, f_2 = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,1}, f_3 = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,2}, f_4 = \sum_{j=1}^m w_j b_{j,3}, f_5 = \sum_{j=1}^m w_j c_j$, 则

$$\mu_i = f_1 + f_2 I_1 + f_3 I_2 + f_4 I_3 + f_5 J \quad (14)$$

根据置信度准则: $h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, h_k$ 称属性测度, $\lambda \in [0.5, 0.7], \lambda$ 取值越大评价结果越保守^[40]。当 $h_{k-1} < \lambda < h_k$ 时,判定水资源脆弱性等级为 k ^[41]。

3 结果与分析

将收集到的新疆 2010—2019 年 25 个指标数据值由公式(1)至(6)计算得到权重,见表 3,再将指标和权重值代入公式(11)至(14)计算得到单指标联系度和综合联系度,并由置信度准则确定新疆的水资源脆弱性水平。

以 2019 年为例,给出脆弱性计算过程和结果,见表 4。

由表 4 可知, $f_1 = 0.3255, f_2 = 0.2933, f_3 = 0.1658, f_4 = 0.1389, f_5 = 0.0765$ 。代入式(14)得 2019 年新疆综合联系度为: $\mu_{2019} = 0.3255 + 0.2933 I_1 + 0.1658 I_2 + 0.1389 I_3 + 0.0765 J$

通常取 $\lambda = 0.5$, 由 $h_1 = f_1 = 0.3255 < 0.5, h_2 = f_1 + f_2 = 0.6188 > 0.5$, 因此 2019 年新疆水资源脆弱性为轻度脆弱(II)。2010—2019 年新疆水资源综合联系度和脆弱性等级计算结果见表 5。

由表 5 可以看出,除 2010、2014 年水资源为重度脆弱外,2011—2013 年、2015—2016 年为中度脆弱,占比 50%,2017—2019 年为轻度脆弱,占比 30%,可知近 10 年新疆的水资源形势向好,逐渐达到轻度脆弱水平。2011—2013 年虽然都为中度脆弱,但 h_k 逐年减小,说明这期间水资源脆弱性有所增强,直到 2014 年水资源转为重度脆弱;2015—2016 年中度脆弱的 h_k 值增大,2017—2019 年轻度脆弱的 h_k 也逐年上升,说明进入 2015 年,水资源状况逐年改善。为分析出现这种变化的原因,由表 2 和指标数据值给出各指标 2010—2019 年脆弱性变化情况(图 1 至 3),再由公式(13)和表 3 的分项权重得到准则层的脆弱性水平,见图 4,将指标层和准则层的脆弱性与系统综合脆弱水平进行对比分析。

表 3 评价指标权重值

Tab. 3 The weight value of each index

指标	分项权重	指标权重	指标	分项权重	指标权重	指标	分项权重	指标权重
P_1	0.0892	0.0374	S_1	0.1056	0.0360	R_1	0.1622	0.0389
P_2	0.1102	0.0463	S_2	0.1040	0.0354	R_2	0.1445	0.0346
P_3	0.0844	0.0354	S_3	0.1552	0.0529	R_3	0.1302	0.0312
P_4	0.1314	0.0552	S_4	0.1274	0.0434	R_4	0.1767	0.0423
P_5	0.0994	0.0417	S_5	0.1909	0.0650	R_5	0.1156	0.0277
P_6	0.0725	0.0304	S_6	0.0933	0.0318	R_6	0.1381	0.0331
P_7	0.0999	0.0419	S_7	0.0836	0.0285	R_7	0.1327	0.0318
P_8	0.1261	0.0529	S_8	0.1400	0.0477			
P_9	0.0874	0.0367						
P_{10}	0.0995	0.0418						

注: 分项权重为各指标在对应准则层中的权重大小。

表 4 2019 年单指标联系度

Tab. 4 Connection degree of each index in 2019

指标	联系度					联系度*权重				
	a_j	$b_{j,1}$	$b_{j,2}$	$b_{j,3}$	c_j	$w_j a_j$	$w_j b_{j,1}$	$w_j b_{j,2}$	$w_j b_{j,3}$	$w_j c_j$
P_1	0.2207	0.7793	0	0	0	0.0083	0.0292	0	0	0
P_2	0	0	0.3870	0.6130	0	0	0	0.0179	0.0284	0
P_3	0.8733	0.1267	0	0	0	0.0309	0.0045	0	0	0
P_4	0.8000	0.2000	0	0	0	0.0441	0.0110	0	0	0
P_5	0.0780	0.9220	0	0	0	0.0033	0.0385	0	0	0
P_6	0.9954	0.0046	0	0	0	0.0303	0.0001	0	0	0
P_7	0.9224	0.0776	0	0	0	0.0387	0.0033	0	0	0
P_8	0.1200	0.8800	0	0	0	0.0064	0.0466	0	0	0
P_9	0	0	0	0.2232	0.7768	0	0	0	0.0082	0.0285
P_{10}	0	0	0	0.2551	0.7449	0	0	0	0.0107	0.0311
S_1	0	0.7897	0.2103	0	0	0	0.0284	0.0076	0	0
S_2	0	0	0.5327	0.4673	0	0	0	0.0189	0.0165	0
S_3	0	0.7038	0.2962	0	0	0	0.0372	0.0157	0	0
S_4	0.8000	0.2000	0	0	0	0.0347	0.0087	0	0	0
S_5	0.1333	0.8667	0	0	0	0.0087	0.0563	0	0	0
S_6	0	0.1280	0.8720	0	0	0	0.0041	0.0277	0	0
S_7	0	0	0.4708	0.5292	0	0	0	0.0134	0.0151	0
S_8	0.9050	0.0950	0	0	0	0.0432	0.0045	0	0	0
R_1	0.9084	0.0916	0	0	0	0.0353	0.0036	0	0	0
R_2	0	0	0	0.5112	0.4888	0	0	0	0.0177	0.0169
R_3	0	0	0.5720	0.4280	0	0	0	0.0178	0.0134	0
R_4	0.9856	0.0144	0	0	0	0.0417	0.0006	0	0	0
R_5	0	0	0.5000	0.5000	0	0	0	0.0138	0.0138	0
R_6	0	0.5063	0.4937	0	0	0	0.0168	0.0163	0	0
R_7	0	0	0.5237	0.4763	0	0	0	0.0166	0.0151	0
求和						0.3255	0.2933	0.1658	0.1389	0.0765

表 5 2010—2019 年水资源脆弱性等级

Tab. 5 Vulnerability level of water resources from 2010 to 2019

年份	综合联系度	h_{k-1}	h_k	脆弱性等级
2010	$\mu_{2010} = 0.1633 + 0.0972I_1 + 0.2079I_2 + 0.2146I_3 + 0.3170J$	$h_3=0.4683$	$h_4=0.6830$	IV
2011	$\mu_{2011} = 0.1005 + 0.2366I_1 + 0.2570I_2 + 0.2339I_3 + 0.1720J$	$h_2=0.3371$	$h_3=0.5941$	III
2012	$\mu_{2012} = 0.0339 + 0.1755I_1 + 0.3649I_2 + 0.2722I_3 + 0.1534J$	$h_2=0.2095$	$h_3=0.5744$	III
2013	$\mu_{2013} = 0.0845 + 0.0823I_1 + 0.3857I_2 + 0.3199I_3 + 0.1276J$	$h_2=0.1668$	$h_3=0.5525$	III
2014	$\mu_{2014} = 0.0287 + 0.0522I_1 + 0.2722I_2 + 0.2923I_3 + 0.3547J$	$h_3=0.3530$	$h_4=0.6453$	IV
2015	$\mu_{2015} = 0.0854 + 0.0686I_1 + 0.4396I_2 + 0.2643I_3 + 0.1421J$	$h_2=0.1540$	$h_3=0.5936$	III
2016	$\mu_{2016} = 0.0970 + 0.2467I_1 + 0.3022I_2 + 0.2134I_3 + 0.1407J$	$h_2=0.3438$	$h_3=0.6459$	III
2017	$\mu_{2017} = 0.1326 + 0.4082I_1 + 0.2314I_2 + 0.1237I_3 + 0.1042J$	$h_1=0.1326$	$h_2=0.5408$	II
2018	$\mu_{2018} = 0.1700 + 0.4306I_1 + 0.2232I_2 + 0.1601I_3 + 0.0161J$	$h_1=0.1700$	$h_2=0.6006$	II
2019	$\mu_{2019} = 0.3255 + 0.2933I_1 + 0.1658I_2 + 0.1389I_3 + 0.0765J$	$h_1=0.3255$	$h_2=0.6188$	II

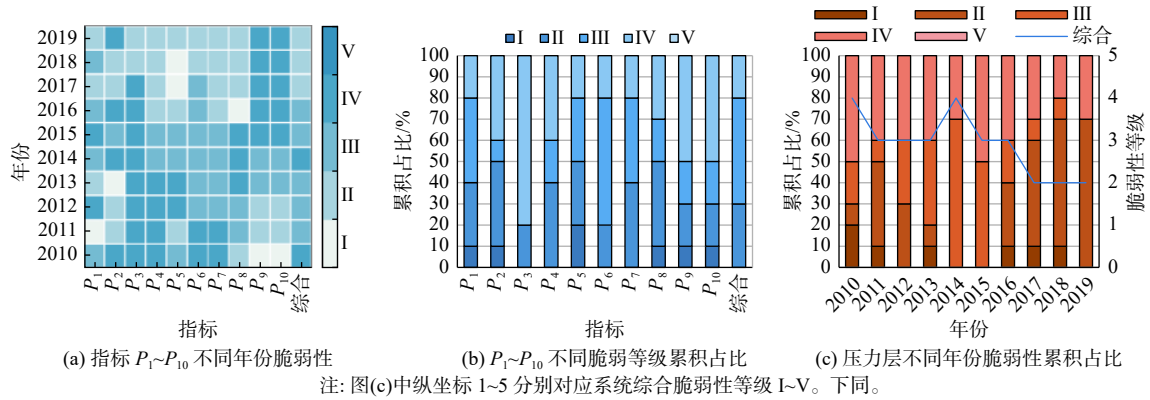


图 1 压力层脆弱性与系统综合脆弱性对比

Fig. 1 Vulnerability comparison between pressure layer and comprehensive system

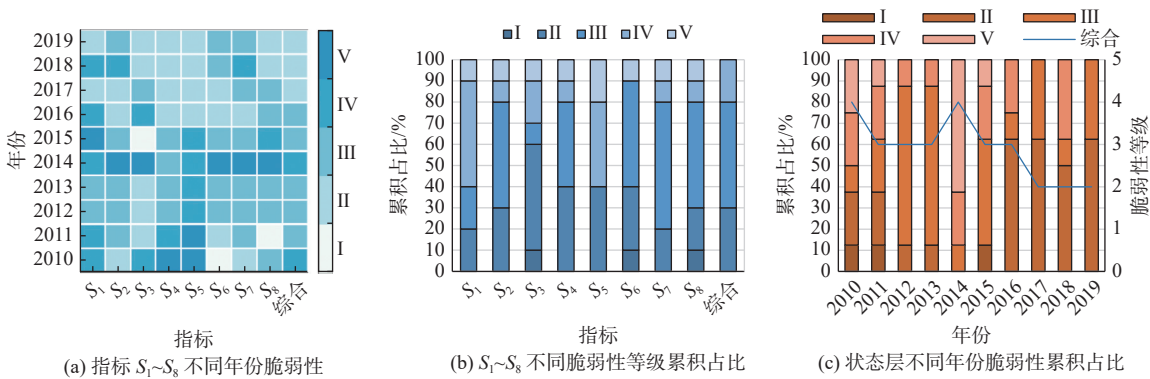


图 2 状态层脆弱性与系统综合脆弱性对比

Fig. 2 Vulnerability comparison between state layer and comprehensive system

图 1 至 3 中, 图(a)为各指标在 2010—2019 年的脆弱性等级, 图(b)为各指标不同脆弱等级累积占比百分比, 图(c)为准则层 2010—2019 年的脆弱等级累积占比百分比。图(a)、(b)、(c)均与系统综合脆弱性进行了对比。以下将脆弱性主要分为较低脆弱性(I~III 等级)、较高脆弱性(IV~V 等级)两个水平进行分析。

由图 1(a)可以看出: 指标 P_1 、 P_2 脆弱性水平不稳定; $P_3 \sim P_7$ 脆弱性逐渐降低, 其中 P_3 在 2018 年由较高脆弱降为较低脆弱, P_4 、 P_5 在 2014 降为较低脆弱, P_6 、 P_7 则在 2012 年就降为较低脆弱; P_8 脆弱性经历了先升高后降低的过程, 在 2016 年变为较低脆弱; P_9 、 P_{10} 脆弱性逐渐升高, 在 2015 年由较低脆弱转为较高脆弱。由图 1(b)可以看出, P_3 较低脆弱性

累积占比为 20%,其他指标的较低脆弱性累积占比均在 50% 及以上,且 P_1 、 $P_5 \sim P_7$ 、 P_{10} 的较低脆弱占比达 80%。由图 1(c)可以看出,压力层指标 2010—2014 年处于较低脆弱性,累积占比由 50% 增加到 70%,2015—2016 年略有下降,2017—2019 年恢复到 70% 的水平,其中:2010—2014 年 III 等级占比由 20% 上升到 70%,IV 等级从 50% 下降到 30%;2015—2019 年,II 等级由 0 上升到 70%。从

整体上看:气候变化型指标脆弱性不稳定,人类活动型指标脆弱性有明显降低或升高趋势;人口自然增长率脆弱性 2010—2017 年一直保持在 IV 级水平,GDP 增长率、人均用水量、万元工业增加值用水量 和 万元 GDP 用水量脆弱性得到明显改善;但化肥使用量和能源消耗量脆弱性增强,2015 年开始保持在 IV 级水平。压力层脆弱性变化与系统整体脆弱性变化趋势基本一致。

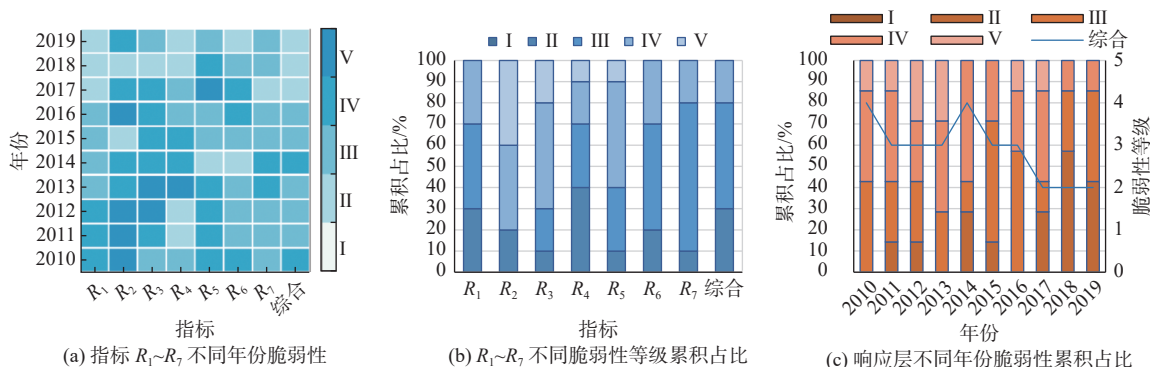


图 3 响应层脆弱性与系统综合脆弱性对比

Fig. 3 Vulnerability comparison between response layer and comprehensive system

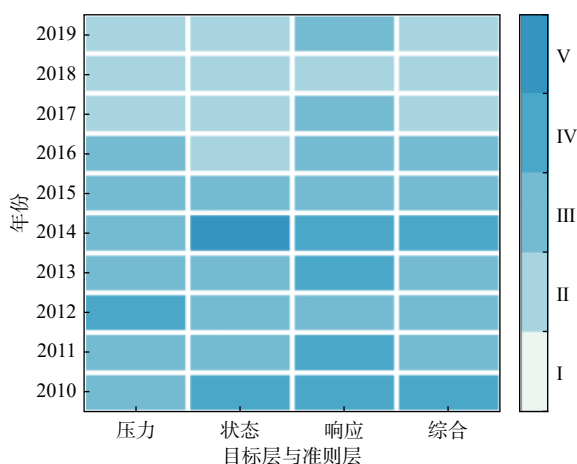


图 4 2010—2019 年准则层脆弱性和系统综合脆弱性对比

Fig. 4 Vulnerability comparison between criterion layer and comprehensive system from 2010 to 2019

由图 2(a)可以看出: $S_1 \sim S_3$ 脆弱性变化不稳定; S_4 、 S_5 分别在 2012、2016 年从较高脆弱降为较低脆弱; S_6 脆弱性除 2014 年外,都为较低脆弱性,但脆弱性发生了升高-降低-升高的变化过程, S_7 情况类似; S_8 脆弱性先升高后降低,除 2014—2015 年外,都为较低脆弱性。由图 2(b)可以看出, S_1 、 S_5 较低脆弱累积占比为 40%,其余指标较低脆弱累积占比为 70%~90%。由图 2(c)可以看出:指标 2010—2013 年处于较低脆弱性,累积占比由 50% 上升为 88%,但 2014 年突降到 13%,2015—2019 年恢复到 100%,

其中,2010—2013 年 III 等级占比由 13% 上升到 75%,2014 降为 13%,2015—2019 年,II 等级由 0 上升到 63%。整体上,受气候变化影响较大的产水系数、产水模数和年平均径流距平百分比绝对值脆弱性不稳定;除产水系数和森林覆盖率脆弱性水平较高外,其余指标脆弱性较低;但 2014 年 7 个指标均在 IV~V 等级,这解释了图 2(c)2014 年的突变。状态层脆弱性变化与系统整体脆弱性变化基本一致。

由图 3(a)可以看出: R_1 脆弱性从 2013 年变为较低脆弱并保持平稳降低; R_2 除 2015、2018 年外均为较高脆弱; R_3 脆弱性经历了先升高后降低,但在 2018 年才转为较低脆弱; $R_4 \sim R_6$ 脆弱性表现为降低-升高-降低; R_7 脆弱性表现为升高-降低-升高,但除 2013—2014 年外都为较低脆弱。由图 3(b)可以看出: R_2 、 R_3 、 R_5 较低脆弱累积占比在 40% 及以下,其余指标较低脆弱累积占比为 70%~80%。由图 3(c)可以看出:指标 2010—2014 年处于较高脆弱性,累积占比保持在 57% 水平,2015—2019 年处于较低脆弱性,占比逐渐达到 86%,其中,2010—2014 年,III 等级占比由 43% 降到 14%,IV 等级占比由 43% 上升到 57%,2015—2019 年,II 等级由 14 上升到 43%。整体上,人均 GDP 脆弱性低,说明区域经济发展较好,但废水治理和环保机构投资力度不够,生态环境用水也得不到保证,特别是 2011—2016

年间生态环境用水量不到 10 亿 m^3 ; 节灌率、水利工程调蓄能力和造林面积管理在近几年取得较好成果, 但要增强其稳定性。响应层脆弱性在 2010—2014 年与系统整体脆弱性变化相反, 2015—2019 年变化基本一致。

由图 4 可以看出, 2010—2014 年准则层脆弱性水平主要为 III ~ IV 等级, 状态层 2014 年达到 V 等级, 2015 年脆弱性开始下降, 脆弱性均为 II ~ III 等级。将准则层脆弱性与综合脆弱性对比发现: 当有两个及以上准则层脆弱性水平相同时, 综合脆弱性与其保持一致, 如 2011 年; 当准则层脆弱性互不相同, 综合脆弱性与中间水平一致, 如 2014 年。状态层脆弱性水平和变化趋势与系统脆弱性最接近。

由图 1 至 3 分析可知, 准则层指标脆弱性的变化趋势除响应层 2010—2014 年外, 其余年份均与系统综合脆弱性变化一致; 图 4 中以 2014 年为节点, 2014 年后准则层脆弱性表现出稳定下降趋势, 且状态层的脆弱性变化与系统最为接近; 由图 1 至 4 可知, 2014 年是脆弱性水平发生显著变化的转折点。

4 结论

通过 PSR 模型构建了新疆水资源脆弱性评价指标体系, 并采用集对分析法和置信度准则计算得到新疆 2010—2019 年水资源的脆弱性水平, 最后将指标层和准则层脆弱性与综合脆弱性做了对比, 得出以下结论:

新疆 2010、2014 年为重度脆弱, 2011—2013 年为中度脆弱, 2011—2014 年脆弱性呈加重趋势, 2015 年后脆弱性逐年降低, 2017—2019 年保持在轻度脆弱, 说明近几年区域水资源形势逐渐好转。

压力层和状态层 2010—2019 年指标脆弱性累积占比变化趋势与综合脆弱性变化趋势基本一致, 响应层 2010—2014 年与综合脆弱性变化相反, 2015—2019 年与其变化一致。准则层和综合脆弱性在 2014 年后都为中度脆弱及以下水平, 其中状态层的脆弱性水平和变化趋势与系统脆弱性最接近。

压力层中人口自然增长率、化肥使用量和能源消耗量脆弱性水平较高, GDP 增长率和用水量指标脆弱性得到明显改善。状态层中产水系数和森林覆盖率脆弱性水平较高, 其余指标脆弱性较低。响应层中人均 GDP 脆弱性保持稳定下降, 节灌率、水利工程调蓄能力和造林面积脆弱性也在近几年下降但稳定性不够, 废水治理、环保机构设置和生态

环境用水保障力度等尚需完善。此外, 2019 年新疆水资源开发利用约 64%, 虽然水资源开发利用因分级标准等原因计算结果显示为较低水平, 但水资源开发水平值得警惕。

综上, 虽然在气候“暖湿化”背景下新疆的水资源情势有一定缓解, 节水灌溉、植树造林也取得一定成效, 区域水资源脆弱性下降, 但经济发展带来的区域用水量增加, 生态用水量不稳定, 能源消费上升等问题。今后不仅要对上述脆弱性不稳定和水平较高的指标加强监测和治理, 对脆弱性较低指标保持住当前发展趋势, 还要加强气温和降水的监测工作, 为新疆的环境保护和经济发展谋求平衡。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C(SR-1.5) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (CMA Climate Change Centre. Blue book on climate change in China (2021) [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)).
- [3] 袁媛, 郑艳. 国内外水资源脆弱性研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 116-125. (YUAN Y, ZHENG Y. Progress and future prospects of water resources vulnerability at home and abroad[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 116-125. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2022.181.
- [4] 田亚平, 向清成, 王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J]. 地理研究, 2013, 32(1): 55-63. (TIAN Y P, XIANG Q C, WANG P. Regional coupled human-natural systems vulnerability and its evaluation indexes[J]. Geographical Research, 2013, 32(1): 55-63. (in Chinese)) DOI: 10.11821/yj2013010006.
- [5] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453. (YANG F, MA C, FANG H J. Research progress on vulnerability: from theoretical research to comprehensive practice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 441-453. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201802020289.
- [6] 张蕊. 基于突变级数法的山西省水资源脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 29-32. (ZHANG

- R. Water resources vulnerability assessment in Shanxi Province by the catastrophe progression method[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 29-32. (in Chinese))
- [7] 黄垒,张礼中,朱吉祥,等. 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 68-73. (HUANG L, ZHANG L Z, ZHU J X, et al. Evaluation of vulnerability of surface water resources in Baoding based on comprehensive index method[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(6): 68-73. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0155.
- [8] 钟姗姗,王化龙. 流域水资源可持续脆弱性回顾评价及敏感度分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 43-50. (ZHONG S S, WANG H L. Retrospective vulnerability evaluation and sensitivity analysis of watershed water resources sustainability[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(1): 43-50. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.07.
- [9] 杨大方,周旭,张继,等. 贵州省水资源脆弱性时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 70-79. (YANG D F, ZHOU X, ZHANG J, et al. Spatio-temporal variation characteristics of water resources vulnerability in Guizhou Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 70-79. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.11.
- [10] 杨法暄,郑乐,钱会,等. 基于DPSIR模型的城市水资源脆弱性评价:以西安市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 77-84. (YANG F X, ZHENG L, QIAN H, et al. Vulnerability assessment of urban water resources based on DPSIR model: A case study of Xi'an City[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, 31(1): 77-84. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.01.12.
- [11] RAINER W. Development of environmental indicators systems: Experiences from Germany[J]. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 613-623. DOI: 10.1007/s002670010048.
- [12] 张彦,李明然,寇利卿. 基于PSR-PCA-ANFIS模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. *中国农村水利水电*, 2022(2): 68-75. (ZHANG Y, LI M R, KOU L Q. Evaluation of water resources security in Baoding Central City based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(2): 68-75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.02.012.
- [13] 王利平,张建云,舒章康,等. 河南省水资源系统脆弱性时空分异特征研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(1): 9-17. (WANG L P, ZHANG J Y, SHU Z K, et al. Study on the spatio-temporal differentiation characteristics of vulnerability of water resources system in Henan Province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2022, 43(1): 9-17. (in Chinese)) DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2022002.
- [14] 吴传余. 基于PSR和熵权模型的安徽省水资源安全评价[J]. *水利科技与经济*, 2017, 23(12): 53-57. (WU C Y. Assessment of water resources security in Anhui Province based on PSR and entropy weight synthetic index method[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2017, 23(12): 53-57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2017.12.010.
- [15] 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. (SU X B, LI X G, LIU J F, et al. Vulnerability assessment of water resources in the northwest typical area based on comprehensive weighting method[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(3): 112-118. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.082.
- [16] 穆瑾,赵翠薇. 变化环境下2000—2015年贵阳市水资源脆弱性评价[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(9): 12-17,28. (MU J, ZHAO C W. Assessment of water resources vulnerability in Guiyang City from 2000 to 2015 under changing environment[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(9): 12-17,28. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.2018.0066.
- [17] 杜娟娟. 基于熵值法的山西省水资源脆弱性模糊综合评价[J]. *水资源开发与管理*, 2018(9): 50-54. (DU J J. Fuzzy comprehensive evaluation of water resource vulnerability in Shanxi Province based on entropy method[J]. *Water Resources Development and Management*, 2018(9): 50-54. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2018.09.11.

- [18] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等.基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 425-432. (HU Q L, DONG Z C, YANG Y F, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.005.
- [19] 赵克勤.集对分析及其初步应用[J].*大自然探索*, 1994, 13(1): 67-72. (ZHAO K Q. Set pair analysis and its preliminary application[J]. *Exploration of Nature*, 1994, 13(1): 67-72. (in Chinese))
- [20] 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): 53-58,78. (ZHANG Z J, CHEN F L, LONG A H, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 53-58,78. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.009.
- [21] 张礼兵,喻海阔,金菊良,等.基于联系数的大型灌区水资源空间均衡评价与优化调控[J].*水利学报*, 2021, 52(9): 1011-1023. (ZHANG L B, YU H G, JIN J L, et al. Evaluation and optimal regulation of spatial equilibrium of water resources in large irrigation area based on connection number[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1011-1023. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20210139.
- [22] 刘锐,李涛.基于熵权集对分析的西北地区耕地生态安全水平差异比较[J].*干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 274-282. (LIU R, LI T. Comparison of differences in cultivated land ecological security levels based on entropy weight set analysis in northwest China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(6): 274-282. (in Chinese)) DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.06.38.
- [23] 张倩.喀斯特水资源系统脆弱性评价方法、比较及其研究:以贵州地区为例[D].贵州:贵州师范大学, 2018. (ZHANG Q. Study and comparisons on the vulnerability of karst water resources system and its evaluation methods: Taking Guizhou as an example[D]. Guizhou: Guizhou Normal University, 2018. (in Chinese))
- [24] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].*冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226. (SHI Y F, SHEN Y P, HU R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001.
- [25] 吴秀兰,张太西,王慧,等.1961—2017年新疆区域气候变化特征分析[J].*沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(4): 27-34. (WU X L, ZHANG T X, WANG H, et al. Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang during 1961-2017[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, 14(4): 27-34. (in Chinese)) DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2020.04.004.
- [26] 姚俊强,陈静,迪丽努尔·托列吾别克,等.新疆气候水文变化趋势及面临的问题思考[J].*冰川冻土*, 2021, 43(5): 1498-1511. (YAO J Q, CHEN J, Dilinuer Twoliwubieke, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1498-1511. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0101.
- [27] 张振龙,孙慧.新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联:基于VAR模型[J].*生态学报*, 2017, 37(16): 5273-5284. (ZHANG Z L, SUN H. Research on the dynamic relationship between water-intensive industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang based on VAR model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5273-5284. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201605190966.
- [28] 邓铭江.三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系[J].*干旱区地理*, 2019, 42(5): 961-975. (DENG M J. System of three-scale multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 961-975. (in Chinese)) DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.01.
- [29] 新疆维吾尔自治区水利厅.新疆维吾尔自治区水资源公报[R]. 2016. (Department of water resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Water resources bulletin of Xinjiang Uygur Autonomous Region [R]. 2016. (in Chinese))
- [30] 姚俊强,李漠岩,迪丽努尔·托列吾别克,等.不同时间尺度下新疆气候“暖湿化”特征[J].*干旱区研究*, 2022, 39(2): 333-346. (YAO J Q, LI M Y, Dilinuer Twoliwubieke, et al. The assessment on “warming-wetting” trend in Xinjiang at multi-scale during 1961-

- 2019[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 333-346. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2022.02.01.
- [31] 宋玉鑫, 马军霞, 左其亭, 等. 新疆多时间尺度干湿变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 43-48. (SONG Y X, MA J X, ZUO Q T, et al. Analysis on characteristics of dry-wet variation on multi-time scale in Xinjiang[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 43-48. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.007.
- [32] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1331-1341. (CHEN Y N, XU C C, YANG Y H, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331-1341. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.11.005.
- [33] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 21-27. (ZUO Q T, LI J W, MA J X, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 21-27. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.004.
- [34] 薛联青, 王晶, 魏光辉. 基于PSR模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 13-19. (XUE L Q, WANG J, WEI G H. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River basin in Xinjiang[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(1): 13-19. (in Chinese))
- [35] 原彩萍, 刘原一, 职璐爽. 基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(5): 112-116,130. (YUAN C P, LIU Y Y, ZHI L S. Water resources vulnerability assessment in Shanxi Province based on fuzzy set pair method[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(5): 112-116,130. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.017.
- [36] 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): 322-329. (ZHI L S, XUE H F. A study on vulnerability of urban water resources based on entropy weight method: A case study of Guangdong Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 322-329. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.051.
- [37] 杜现增, 袁榆梁, 孟钰, 等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 145-151. (DU X Z, YUAN Y L, MENG Y, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 145-151. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.022.
- [38] 鲁晓, 董增川, 张城, 等. 基于集对分析的水资源承载状态评价研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(11): 53-57,116. (LU X, DONG Z C, ZHANG C, et al. Research on evaluation of water resources carrying status based on set pair analysis[J]. *Yellow River*, 2020, 42(11): 53-57,116. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.11.011.
- [39] 管文闯, 饶碧玉, 路远, 等. 基于DPSIRM模型的高原城市水源地水资源脆弱性评价及障碍诊断[J]. *中国农村水利水电*, 2022(3): 147-154,162. (GUAN W C, RAO B Y, LU Y, et al. Evaluation of water resources vulnerability and obstacle diagnosis of water resources in plateau cities based on DPSIRM model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3): 147-154,162. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.03.023.
- [40] 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(9): 167-171. (ZHANG X. Analysis model application in water resource vulnerability evaluation based on fuzzy set of entropy weight method[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2018(9): 167-171. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2018.09.057.
- [41] 吴凡, 陈伏龙, 丁文学, 等. 基于模糊集对分析-五元减法集对势的新疆水资源承载力评价[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(9): 27-34. (WU F, CHEN F L, DING W X, et al. Assessing water resources carrying capacity of Xinjiang using fuzzy set pair analysis and five-variable subtraction set pair potential[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(9): 27-34. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20200635.

Vulnerability assessment of water resources based on pressure-state-response model in Xinjiang

FAN Ling¹, WANG Huixiao¹, LIU Changming², SUI Guanhang¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Xinjiang Uygur Autonomous Region is one of the most sensitive regions to climate change in the world. Since Shiyafeng pointed out in 2003 that the climate in Xinjiang had changed from "warm-dry" to "warm-wet", many scholars researched climate change in Xinjiang. However, most of these studies mainly focused on the trend of climate change and the impact on runoff, vegetation, glaciers, etc., and rarely combined the environmental change with the social economy. The annual average precipitation in Xinjiang is about 153 mm, and the characteristics of oasis economy and irrigation agriculture make its water resources closely linked with regional development. A comprehensive method for water resources vulnerability is used to evaluate the water resources situation in Xinjiang from 2010 to 2019.

The vulnerability of water resources can comprehensively indicate the adverse effects of climate change and human activities on water resources system and the measures taken by human society to maintain the balance of water system. The evaluation index system, which included a target layer, criterion layer, and index layer was established by this model and 25 indexes were selected because the causal relationship between water resources vulnerability elements (exposure, sensitivity, adaptability) and human activities can be accurately expressed with the pressure-state-response model. The vulnerability of water resources was divided into five grades, including non-vulnerability, slight vulnerability, moderate vulnerability, severe vulnerability, and extreme vulnerability. After gaining the indexes' data, the vulnerability standards of each index were obtained through the equal distance dispersion method, and the index weight was calculated by the entropy weight method. The vulnerability level of water resources in Xinjiang was gained by the set pair analysis, which could deal with the certainty and uncertainty within and between systems, and had been well applied in the field of water resources.

The results showed that Xinjiang was severely vulnerable in 2010 and 2014, moderately vulnerable in 2011-2013 and 2015-2016, and slightly vulnerable in 2017-2019, which shows the vulnerability level of water resources in Xinjiang gradually decreased except in 2014. Comparing the vulnerability of the criterion layer and index layer with the comprehensive vulnerability of the system, it can be seen that the vulnerability of pressure layer's climate change indicators was unstable, while the human activity indicators had obvious vulnerability trends. Among the 10 indicators of pressure layer, the natural growth rate of population was mainly severe-vulnerability, and the vulnerability of GDP growth rate, per capita water consumption, water consumption of 10 000 yuan industrial added value and water consumption of 10 000 yuan GDP was significantly improved. However, fertilizer and energy consumption were increased to severely vulnerable. In the state layer, in addition to water production coefficient and forest coverage, other indicators had a low vulnerability, but attention should be paid to the degree of water resources development. The vulnerability of per capita GDP in the response layer gradually declined from 2010 to 2019. While the vulnerability of irrigation conservation, water conservancy projects and afforestation didn't decrease until recent years. Nevertheless, wastewater treatment, environmental protection institutions and water consumption in the ecological environment were still inadequate. From 2010 to 2014, the vulnerability level of the criterion layer was mainly moderate vulnerability and severe vulnerability and it began to decline to slightly vulnerable from 2015. The vulnerability change trend of the state layer was the closest to that of the system.

On the whole, the vulnerability situation of water resources in Xinjiang has gradually improved, and the vulnerability level of some indicators decreased too. In the future, we should not only strengthen the monitoring and governance of indicators with high and unstable vulnerability but also stabilize indicators with low vulnerability to maintain the vulnerability of regional water resources at a low level.

Key words: vulnerability of water resources; PSR model; evaluation index system; entropy method; set pair analysis