

基于模糊集对分析法的丘北县水资源脆弱性评价

杨艳梅, 黄义忠*

(昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:通过 DPSIR 框架构建包含年降水量等 14 个指标的丘北县水资源脆弱性指标体系, 利用熵权法确定权重, 通过模糊集对分析法和五元引力减法集对势对 2009—2019 年丘北县水资源脆弱性和发展态势进行评价。结果表明: 驱动力层和压力层的脆弱性呈明显恶化的发展态势并有持续的趋势, 影响层虽然总体呈好转态势但未来可能恶化, 状态层和响应层发展态势较稳定, 未来需要密切关注驱动力层、压力层和影响层的发展态势; 丘北县 2009 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年水资源脆弱性分别为轻度脆弱、中度脆弱、中度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱, 整体脆弱性等级较高, 且整体发展呈恶化态势, 水资源脆弱性问题不容乐观。

关键词:水资源脆弱性评价; DPSIR 模型; 集对势; 模糊集对分析法; 丘北县

中图分类号: X821

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2024)06-0036-06

Assessment of Water Resources Vulnerability in Qiubei County Based on Fuzzy Set Pair Analysis

YANG Yanmei, HUANG Yizhong*

(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Using the DPSIR framework, a water resource vulnerability index system was constructed in Qiubei County, including 14 indicators such as annual precipitation, the weights were determined by entropy weight method, the vulnerability and development trend of the water resources in Qiubei County from 2009 to 2019 were evaluated by fuzzy set pair analysis and five-variable gravity subtraction set pair potential. The results indicated that the vulnerability of the driving force layer and pressure layer showed significant and continuous deterioration. Although the overall situation of the impact layer was improving, it might deteriorate in the future. The development of the state layer and response layer was stable. In the future, it was necessary to pay close attention to the development of driving force layer, pressure layer and influence layer. The water resource vulnerability in Qiubei County in 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, and 2019 was mild, moderate, moderate, mild, moderate and severe, respectively. The overall vulnerability had a high level and a worsening trend, and the situation was not optimistic.

Key words: Water resources vulnerability assessment; DPSIR method; Set pair potential; Fuzzy set pair analysis method; Qiubei County

水资源作为不可或缺的自然资源, 是区域发展的决定性因素之一, 在生态系统^[1]和城市规划^[2]中都发挥了重要作用。由于受人口增长和气候变化等因素的影响, 水资源脆弱性日益凸显, 制约着区域的社会经济和生态环境发展。水资源脆弱性一直是全球亟待解决的问题, 是当今水资源领域的

研究热点^[3]。水资源脆弱性评价方法主要有综合

收稿日期: 2023-11-10; 修订日期: 2024-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41761081); 云南省社科规划办重点基金资助项目(ZD202218)

作者简介: 杨艳梅(1999—), 女, 四川西充人, 在读研究生, 研究方向为国土资源遥感。

* 通信作者: 黄义忠 E-mail: hyizhong@163.com

指数法^[4]、函数法^[5-6]、GIS 法^[7]、情景分析法^[8]。其中,综合指数法能够较为全面地反映水资源脆弱性,是目前研究中运用较多的定量评价方法。这些评价方法本身的复杂性及需要大量数学知识使其应用不便,故学者赵克勤^[9]提出了基于对立统一观点的集对分析法。王文圣等^[10]建立了系统的水资源系统评价新方法——模糊集对分析法,并在水资源脆弱性评价^[11-12]方面得到广泛应用。

虽然国内水资源脆弱性评价研究较多,但针对喀斯特地区的水资源脆弱性研究较少。如吕文凯等^[13]对滇东岩溶断陷地区 2017 年水资源脆弱性现状进行评估;段顺琼等^[14]对玉溪市 2005—2007 年水资源脆弱性进行评价;崔东文^[15]对 2010 年云南文山州水资源脆弱性评价,并对 2020 年和 2030 年水资源脆弱性进行预测等。总之,现有的喀斯特地区水资源脆弱性研究大部分在研究尺度和研究时段的选取方面有所欠缺,研究集中在中观尺度,且研究跨度较短,时效性不强。丘北县作为典型的喀斯特地貌地区,县内有着著名的普者黑景区,其水资源面临很大的挑战。今以 2009—2019 年丘北县的水资源脆弱性为研究对象,通过驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型构建指标体系,基于模糊集对分析法进行定量评价,探讨水资源脆弱性的敏感指标,为丘北县水资源的开发利用和保护提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

丘北县位于 E103°34′ ~ E104°45′, N23°45′ ~ N24°28′ 之间,国土总面积为 4 997 km²,地处滇东南岩溶丘陵地带,地势西高东低,海拔为 1 452 m。主要河流有南盘江、清水江、沱粮江及大河,属红水河水系。气候属于亚热带,年平均气温为 16.4℃,雨量充沛,年平均降水量为 1 182.4 mm,水系发达。水资源虽然丰富,但分布不均,水利工程较少,水利化程度较低。

1.2 数据来源

气象水文数据分别来源于 2009—2019 年文山州及丘北县气象局和水务局,统计数据来源于丘北县统计年鉴,其中人均生活用水量、人均水资源量、地下水比例由收集的相关数据计算得出。

1.3 DPSIR 模型

1.3.1 构建评价指标体系

基于 DPSIR 模型,以丘北县水资源脆弱性为目标层,驱动力、压力、状态、影响和响应为准则层,遵循科学性、综合性、可操作性、区域性等原则,并借鉴相关研究^[14-15]的指标体系,选取年降水量等 14 个指标为指标层,构建丘北县水资源脆弱性评价指标体系,见表 1。根据不同指标对评价结果的作用不同,将指标划分为正向指标和负向指标。其中,年降水量、人均水资源量、森林覆盖率、产水模

表 1 丘北县水资源脆弱性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water resource vulnerability in Qiubei County

准则层	指标层	不脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱	类型
驱动力	年降水量(mm)	> 1 324.1	(1 154.9, 1 324.1]	(985.6, 1 154.9]	(816.4, 985.6]	≤ 816.4	正向
	人口密度(人/km ²)	< 93.9	[93.9, 95.6)	[95.6, 97.4)	[97.4, 99.1)	≥ 99.1	负向
	GDP(亿元)	< 22.1	[22.1, 54.6)	[54.6, 75.7)	[75.7, 96.8)	≥ 96.8	负向
	城镇化率(%)	< 19.6	[19.6, 24.4)	[24.4, 29.3)	[29.3, 33.3)	≥ 33.3	负向
压力	年平均温度(℃)	< 16.9	[16.9, 17.3)	[17.3, 17.7)	[17.7, 18.1)	≥ 18.1	负向
	人均生活用水量(m ³)	< 79.5	[79.5, 89.2)	[89.2, 98.8)	[98.8, 108.5)	≥ 108.5	负向
状态	农业用水总量(m ³)	< 8 353.4	[8 353.4, 9 391.4)	[9 391.4, 10 429.5)	[10 429.5, 11 462.5)	≥ 11 462.5	负向
	人均水资源量(m ³)	> 3 000	(2 500, 3 000]	(1 500, 2 500]	(500, 1 500]	≤ 500	正向
影响	地下水比例(%)	< 20	[20, 30)	[30, 40)	[40, 50)	≥ 50	负向
	森林覆盖率(%)	> 44.5	(42.1, 44.5]	(38.6, 42.1]	(35.1, 38.6]	≤ 35.1	正向
响应	产水模数(万 m ³ /km ²)	> 45.2	(39.9, 45.2]	(34.6, 39.9]	(29.3, 34.6]	≤ 29.3	正向
	水资源开发利用率(%)	< 5	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	≥ 20	负向
	万元 GDP 用水量(m ³)	< 174.2	[174.2, 258.7)	[258.7, 343.2)	[343.2, 427.7)	≥ 427.7	负向
	人工生态环境补水(万 m ³)	> 75.6	(61.2, 75.6]	(46.7, 61.2]	(32.2, 46.7]	≤ 32.2	正向

数、人工生态环境补水量为正向指标,值越大,水资源脆弱性越低;人口密度、GDP、城镇化率、年平均温度、人均生活用水量、农业用水总量、地下水比例、水资源开发利用、万元 GDP 用水量为负向指标,值越大,水资源脆弱性越高。

1.3.2 确定评价等级标准

参考喀斯特地区已有水资源评价^[16]的等级,将丘北县水资源脆弱性划分为 5 个等级:不脆弱(I)、轻度脆弱(II)、中度脆弱(III)、重度脆弱(IV)、极度脆弱(V);人均水资源量、水资源开发利用、地下水比例参考国际标准及已有喀斯特地区水资源脆弱性评价等级标准确定,其他指标评价等级标准划分见文献[17]。

1.4 模糊集对分析法

模糊集对分析法的基本原理是对不确定性系统中的两个有关联的集合构造集对,对集对的某特性做同一性、差异性、对立性分析,建立集对的同、异、反联系度^[10]。

1.4.1 确定联系度

两个有联系的集合 $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$, $Y(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 构成集对 $H(X, Y)$ 。描述 $H(X, Y)$ 间关系的联系度定义为:

$$\mu_{X-Y} = \frac{S}{n} + \frac{F}{n}I + \frac{P}{n}J \tag{1}$$

式中: S 为同一性的个数, F 为差异性的个数, P 为对立性的个数, $S+F+P=n$; I 为差异不确定系数,在 $(-1, 1)$ 区间视不同情况取值,有时仅起差异标记作用; J 为对立系数,且 $J=-1$,有时起对立标记作用。记 $a=S/n, b=F/n, c=P/n$,式(1)可写成:

$$\mu_{X-Y} = a + bI + cJ \tag{2}$$

式中: a, b, c 为联系度分量,且满足 $a + b + c = 1$ 。 a, b, c 分别称为集对 $H(X, Y)$ 的同一度、差异度、对立度^[11]。

将丘北县水资源脆弱性分为 5 个等级,建立指标值集合 $X_l(l=1, 2, \dots, n, n$ 为评价指标数)和评价等级集合 $Y_k(k=1, 2, \dots, 5, k$ 为评价等级数)的联系度公式,模糊五元联系度公式如下:

$$\mu_{X-Y} = a + b_1I_1 + b_2I_2 + b_3I_3 + cJ \tag{3}$$

式中: a, b_1, b_2, b_3, c 分别为联系度分量, $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$; I 称为差异度分量,如轻度差异、中度差异、重度差异。

正向指标联系度公式为:

$$\mu_l = \begin{cases} 1 & (X_l \geq S_1) \\ \frac{2X_l - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2X_l}{S_1 - S_2}i_1 & \left(\frac{S_1 + S_2}{2} \leq X_l < S_1\right) \\ \frac{2X_l - S_2 - S_3}{S_1 - S_3}i_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2X_l}{S_1 - S_3}i_2 & \left(\frac{S_2 + S_3}{2} \leq X_l < \frac{S_1 + S_2}{2}\right) \\ \frac{2X_l - S_3 - S_4}{S_2 - S_4}i_2 + \frac{S_2 + S_3 - 2X_l}{S_2 - S_4}i_3 & \left(\frac{S_3 + S_4}{2} \leq X_l < \frac{S_2 + S_3}{2}\right) \\ \frac{2X_l - 2S_4}{S_3 - S_4}i_3 + \frac{S_3 + S_4 - 2X_l}{S_3 - S_4}J & \left(S_4 \leq X_l < \frac{S_3 + S_4}{2}\right) \\ J & (X_l < S_4) \end{cases} \tag{4}$$

式中: S_1, S_2, S_3, S_4 分别是评价等级标准的 4 个临界值,从大到小排列。

负向指标联系度公式为:

$$\mu_l = \begin{cases} 1 & (X_l \leq S_1) \\ \frac{S_1 + S_2 - 2X_l}{S_2 - S_1} + \frac{2X_l - 2S_1}{S_2 - S_1}i_1 & \left(S_1 < X_l \leq \frac{S_1 + S_2}{2}\right) \\ \frac{S_2 + S_3 - 2X_l}{S_3 - S_1}i_1 + \frac{2X_l - S_1 - S_2}{S_3 - S_1}i_2 & \left(\frac{S_1 + S_2}{2} < X_l \leq \frac{S_2 + S_3}{2}\right) \\ \frac{S_3 + S_4 - 2X_l}{S_4 - S_2}i_2 + \frac{2X_l - S_2 - S_3}{S_4 - S_2}i_3 & \left(\frac{S_2 + S_3}{2} < X_l \leq \frac{S_3 + S_4}{2}\right) \\ \frac{2S_4 - 2X_l}{S_4 - S_3}i_3 + \frac{2X_l - S_3 - S_4}{S_4 - S_3}J & \left(\frac{S_3 + S_4}{2} < X_l \leq S_4\right) \\ J & (X_l > S_4) \end{cases} \tag{5}$$

式中: S_1, S_2, S_3, S_4 分别是评价等级标准的 4 个临界值,从小到大排列。

1.4.2 根据置信度确定等级

根据置信度公式^[18]确定评价等级,其中置信度一般在[0.50, 0.70]内取值,文中取 0.5。

1.5 五元引力减法集对势

五元引力减法集对势是金菊良等^[19]在三元减法集对势基础上提出并修正,其对脆弱性关键指标识别更敏感也更有效。引用五元引力减法集对势分析丘北县水资源脆弱性的发展态势,并对脆弱性准则层和年份进行识别。按照均分原则,将集对势划分为 5 个态势等级: [-1.0, -0.6] 属于反势, [-0.6, -0.2] 属于偏反势, [-0.2, 0.2] 属于均势, (0.2, 0.6] 属于偏同势, (0.6, 1.0] 属于同势。

2 结果与讨论

2.1 指标权重

采用熵权法^[20]对丘北县水资源脆弱性指标进行权重赋值,并计算指标在准则层内的权重,见表 2。

指标权重反映了指标在丘北县水资源脆弱性评价中的影响作用大小。由表 2 可知,指标中权重最大的是农业用水总量,达到 0.104,权重最小的是万元 GDP 用水量,为 0.046,年降水量、城镇化率、人均生活用水量、人均水资源量、产水模数的权重均 ≥ 0.08,表明这些指标在丘北县水资源脆弱性评价中占主要地位;GDP、年平均温度、水资源开发利用率权重均 < 0.05,表明这些指标在丘北县水资源脆弱性评价中占次要地位;其他指标在水资源

表 2 单一指标权重及其在准则层内权重

Table 2 Weight of single indicator and its weight within the criterion layer

准则层	权重	指标	权重	准则层内权重
驱动力	0.283	年降水量	0.084	0.297
		人口密度	0.070	0.247
		GDP	0.049	0.173
		城镇化率	0.080	0.283
压力	0.243	年平均温度	0.049	0.202
		人均生活用水量	0.090	0.370
		农业用水总量	0.104	0.428
状态	0.148	人均水资源量	0.086	0.581
		地下水比例	0.062	0.419
影响	0.163	森林覆盖率	0.077	0.472
		产水模数	0.086	0.528
响应	0.163	水资源开发利用率	0.049	0.301
		万元 GDP 用水量	0.046	0.282
		人工生态环境补水量	0.068	0.417

脆弱性评价中起中等作用。在准则层中,所占权重最大的是驱动力层,权重为 0.283,其次是压力层,权重为 0.243,最小的是状态层,权重为 0.148,影响层和响应层所占权重相等,为 0.163。

2.2 准则层脆弱性评价等级及态势等级

用公式(4)和公式(5)分别对丘北县 2009 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年水资源脆弱性的正向指标和负向指标进行计算,得到其单指标五元联系度,当权重取准则层内权重时计算结果为准则层五元联系度。2009—2019 年各准则层脆弱性评价等级及态势等级见表 3。

表 3 2009—2019 年各准则层脆弱性评价等级及态势等级

Table 3 Assessment level and situation level of vulnerability at each criterion layer from 2009 to 2019

年份	驱动力层			压力层			状态层			影响层			响应层		
	脆弱性等级	势值	等级	脆弱性等级	势值	等级	脆弱性等级	势值	等级	脆弱性等级	势值	等级	脆弱性等级	势值	等级
2009 年	I	0.41	偏同势	I	0.94	同势	I	0.95	同势	V	-0.94	反势	V	-0.72	反势
2011 年	III	-0.13	均势	II	0.75	同势	II	0.97	同势	V	-1.00	反势	III	0.28	偏同势
2013 年	III	-0.14	均势	III	-0.81	反势	I	0.92	同势	V	-0.95	反势	II	0.84	同势
2015 年	III	0.49	偏同势	IV	-0.92	反势	I	0.93	同势	I	1.00	同势	I	0.95	同势
2017 年	IV	-0.36	偏反势	IV	-0.33	偏反势	I	0.89	同势	I	0.77	同势	II	0.09	均势
2019 年	V	-0.93	反势	V	-0.94	反势	I	0.87	同势	IV	-0.36	偏反势	III	0.95	同势

由表 3 可知,研究期间驱动力层和压力层脆弱性等级逐年上升,驱动力层和压力层脆弱性越来越高,影响层和响应层脆弱性等级先降后升,状态层脆弱性情况较好,脆弱性整体较低且保持稳定。驱动力层的发展态势在 2009—2015 年间一直呈均势

和偏同势,说明这段时期驱动力层的脆弱性整体保持较好,没有明显朝恶化的方向转变;而 2017—2019 年其发展态势却连续出现偏反势和反势,且 2017 年和 2019 年势值较 2015 年变化较大,表明驱动力层的脆弱性出现了明显变化,有恶化趋势。

压力层的发展态势仅有 2009 年和 2011 年为同势,且 2013 年、2015 年、2019 年均为反势,势值越来越低,在 2019 年降到最低,脆弱性最高。这些都表明压力层保持恶化的发展态势,压力层脆弱性问题亟待解决。状态层发展态势一直保持稳定,均为同势,表明状态层保持较好,无明显变化。影响层与压力层发展态势相反,2009 年、2011 年、2013 年一直保持反势,说明期间脆弱性问题一直在恶化;虽然 2015 年、2017 年、2019 年相较之前势值均明显升高,表明影响层脆弱性问题在逐渐改善,但 2019 年态势为偏反势,须及时应对,以防发展态势转为反势。响应层态势除 2009 年为反势外,其余

时期均为均势、同势或偏同势,脆弱性的发展态势良好。

2.3 目标层脆弱性评价等级及态势等级

根据模糊集对分析法计算出各指标的联系度分量,水资源脆弱性的联系度分量分别是通过各指标的联系度分量与指标权重相乘并求和得到,之后通过置信度公式确定水资源脆弱性等级。水资源脆弱性五元引力减法集对势基于金菊良等^[19]文献中的公式计算得到,态势等级按照均分原则划分。丘北县 2009 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年水资源脆弱性联系度分量及其脆弱性等级评价结果、势值及态势等级见表 4。

表 4 目标层脆弱性评价等级及态势等级

Table 4 Assessment level and situation level of target layer vulnerability

年份	a	b_1	b_2	b_3	c	脆弱性等级	势值	等级
2009 年	0.494	0.096	0.050	0.054	0.306	II	0.21	偏同势
2011 年	0.168	0.368	0.206	0.012	0.246	III	-0.15	均势
2013 年	0.140	0.122	0.379	0.137	0.222	III	-0.17	均势
2015 年	0.454	0.084	0.164	0.194	0.104	II	0.54	偏同势
2017 年	0.357	0.057	0.112	0.193	0.281	III	0.09	均势
2019 年	0.164	0.057	0.230	0.210	0.339	IV	-0.35	偏反势

由表 4 可知,2009—2019 年丘北县水资源脆弱性发展不稳定,2009—2019 年丘北县水资源脆弱性等级逐渐升高,脆弱性问题愈发严重。2009 年和 2015 年水资源脆弱性评价等级最低,为轻度脆弱;2011 年、2013 年、2017 年水资源脆弱性评价等级为中度脆弱;2019 年水资源脆弱性评价等级最高,为重度脆弱。2009 年和 2015 年的发展态势均为偏同势,2011 年、2013 年、2017 年均为均势,2019 年为偏反势,说明丘北县水资源脆弱性存在向脆弱性等级高的方向转变趋势。

2.4 讨论

(1) 科学性。基于 DPSIR 模型构建的丘北县水资源脆弱性评价指标体系,不仅从影响水资源脆弱性的各方面综合选取评价指标,而且综合考虑了丘北县以农业为主要支撑、旅游业发达,以及退耕还林政策等,选取了包含农业用水总量等在内的 14 个指标,选取较科学且具有代表性。

(2) 对策建议。结合水资源脆弱性评价结果及态势等级结果,改善丘北县水资源脆弱性重点在于改善县内农业基础设施,丘北县以农业为主,且农业基础设施落后,灌溉效率低;其次提高水资源

利用率,虽然水资源总量丰富,但水利工程较少且分布不均衡,水资源利用率低。

(3) 不足与改进。虽然评价结果为未来丘北县水资源的开发利用和提出针对水资源脆弱性的改善举措提供一定理论参考,但由于数据收集存在难度,构建的丘北县水资源脆弱性评价指标体系还有待完善。后续若能收集乡镇的相关数据,则可以对丘北县水资源脆弱性进行分区,建立更有针对性的指标体系,进行水资源脆弱性时空演变分析等。

3 结论

(1) 基于 DPSIR 模型,选取 14 个指标构建丘北县水资源脆弱性评价指标体系,其中农业用水总量、年降水量、城镇化率、人均生活用水量、人均水资源量、产水模数等指标起主导作用;在准则层中,驱动力层和压力层起主导作用。

(2) 对准则层脆弱性及发展态势进行分析,驱动力层和压力层脆弱性问题有明显恶化的态势,脆弱性等级整体升高;状态层长期保持不脆弱;影响层脆弱性等级波动较大,不稳定;响应层整体脆弱性转好,发展态势良好。

(3) 丘北县 2009 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年水资源脆弱性分别为轻度脆弱、中度脆弱、中度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱。丘北县多年来脆弱性等级偏高,且自 2015 年以来水资源脆弱性等级持续升高,水资源脆弱性情况不容乐观。从发展态势来看,2009 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年丘北县水资源脆弱性保持均势或偏同势的发展态势,2019 年发展态势为偏反势,表明未来丘北县水资源脆弱性有持续恶化的趋势。

[参考文献]

- [1] 欧阳虹,孙旭杨,邱小琮,等. 宁夏太阳山湿地水生生态系统健康评价[J]. 环境监测管理与技术,2022,34(4):38-42.
- [2] 王秦,杨博. 雄安新区资源环境承载力评价与提升对策研究[J]. 环境监测管理与技术,2022,34(6):31-36.
- [3] 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.
- [4] 刘引鸽,杨雨欣,包江川,等. 基于模糊综合指数法的陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(6):18-27.
- [5] 赵红玲,易琦,陈俊旭,等. 基于熵权的玉溪市水资源脆弱性及其时空异质性研究[J]. 水电能源科学,2017,35(9):37-41.
- [6] ZAREPOUR M M, YOUSEFI A, AMINI A M, et al. Rural vulnerability to water scarcity in Iran: an integrative methodology for evaluating exposure, sensitivity and adaptive capacity[J]. GeoJournal, 2023, 88(2): 2121-2136.
- [7] DUARTE L, MARQUES J E, TEODORO A C. An open source GIS-based application for the assessment of groundwater vulnerability to pollution[J]. Environments, 2019, 6(7): 1-20.
- [8] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289(5477): 284-288.
- [9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [10] 王文圣,金菊良,丁晶,等. 水资源系统评价新方法——集对评价法[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2009,39(9):1529-1534.
- [11] 李继清,邓世浪,张鹏. 基于集对云模型和减法集对势的河南省水资源脆弱性评价[J]. 中国农村水利水电,2023(2):1-8.
- [12] 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.
- [13] 吕文凯,周金星,万龙,等. 滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J]. 地球学报,2021,42(3):341-351.
- [14] 段顺琼,王静,冯少辉,等. 云南高原湖泊地区水资源脆弱性评价研究[J]. 中国农村水利水电,2011(9):55-59.
- [15] 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.
- [16] 张凤太,王腊春,苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学,2015,35(11):3511-3520.
- [17] 孔滕滕. 濮阳市水资源脆弱性评价[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.
- [18] 黄星,陈伏龙,赵琪,等. 新疆和田河径流丰枯评价及组合分析[J]. 干旱区研究,2021,38(6):1570-1578.
- [19] 金菊良,郭涵,李征,等. 基于水资源承载力动态评价的五元引力减法集对势方法[J]. 灌溉排水学报,2021,40(6):1-7.
- [20] 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.

· 征订启事 ·

欢迎订阅 2025 年《环境监控与预警》杂志

《环境监控与预警》创刊于 2009 年,是由江苏省生态环境厅主管、江苏省环境监测中心主办、南京大学环境学院协办的期刊。被中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、JST 日本科学技术振兴机构数据库收录。期刊面向全国公开发行,国内统一刊号 CN 32-1805/X,国际标准刊号 ISSN 1674-6732。

本刊致力于传播和推广先进的环保科技成果,聚焦环境前沿科技,介绍国内外环境监测、环境预警、环境信息等领域的新技术、新成果、新发展,跟踪国家及地方的环境政策、环境标准的变化。读者对象主要是从事环境管理、环境监测、环境监察、环境信息、环境治理、环境科学研究及其他领域的环境工作者。常设栏目有:前沿评述、环境预警、监测技术、解析评价、监管新论等。

本刊为双月刊,大 16 开国际标准版,108 页,每逢单月 30 日出版。国内定价(含邮费)35 元/期,全年 210 元。

订阅方法:1. 邮局订阅:邮发代号:28-414。或扫右侧邮政二维码订阅。

2. 编辑部订阅:汇款后将回执单 E-mail 至联系人:谭艳;

电话:025-69586548;邮箱:hjkyjy@163.com。

(电子版回执单下载地址:http://www.hjkyjy.com)

汇款信息:单位名称:江苏省环境监测中心

开户行:中国银行南京凤凰花园城支行 账号:530058192469

