

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.009

基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价

张志君¹, 陈伏龙¹, 龙爱华^{1,2}, 何新林¹, 乔长录¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:根据区域水资源现状,选取18个评价指标,建立了包括水资源、经济社会、生态环境、供需4个准则层的区域水安全评价指标体系;通过熵权法确定指标权重,采用基于模糊集对分析的水资源安全评价方法,对2016年新疆水资源安全状况进行了评价。结果表明:新疆水资源整体的安全状况属于基本安全等级,空间分布上北疆优于南疆和东疆;评价结果与物元分析法和综合指数法评价结果总体上一致,评价结果具有合理性。

关键词:水资源安全评价;模糊集对分析法;熵权法;新疆

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0053-06

Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis // ZHANG Zhijun¹, CHEN Fulong¹, LONG Aihua^{1,2}, HE Xinlin¹, QIAO Changlu¹ (1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: According to the current situation of regional water resources, 18 evaluation indexes were selected and an evaluation index system of regional water security was established, which includes four criteria levels: water resources, economic society, ecological environment, supply and demand. The index weight was determined by entropy weight method, and the water resources security evaluation method based on fuzzy set pair analysis was used to evaluate the water resources security situation of Xinjiang in 2016. The evaluation results show that the overall security of water resources in Xinjiang belongs to the basic security level, and the spatial distribution of Northern Xinjiang is better than that of southern and eastern Xinjiang. The evaluation results are generally consistent with the results of matter-element analysis and comprehensive index method, and the evaluation results are reasonable.

Key words: water resources security evaluation; fuzzy set pair analysis method; entropy weight method; Xinjiang

水作为一种自然资源,是维持人生命、促进社会经济发展、保障良好生态环境的基础物质。在全球气候变暖背景下,可利用的水资源与人类日益增长的用水需求之间的矛盾日益凸显,导致水资源短缺、水土流失和水生态环境破坏等一系列水安全问题^[1]。新疆位于我国西北干旱地区,水安全环境显得尤其脆弱,主要体现在:不合理的开发利用方式与灌溉定额导致低水平的用水效益及区域土壤盐渍化;农业用水挤占生态用水,使得下游天然绿洲萎缩,生态环境进一步恶化;上游与中下游用水需求的竞争关系,扩大了区域生产用水的矛盾^[1-2]。

目前,区域水资源安全评价方法主要有模糊综合评价法^[3]、物元分析法^[4]、投影寻踪法^[5]、神经网络法^[6]和综合指数法^[7]等。以上方法为区域水资源安全评价提供了有效的手段,但同时存在一些不足之处,例如:神经网络法需要用大量典型样本作为测试集进行训练,算法易陷入局部极值而导致训练失败;模糊综合评价方法存在较难确定合理的隶属度函数的问题^[8],且由于隶属度函数的差异会导致评价同一个对象的评价结果差异较大。集对分析法是一种处理事物确定与不确定性关系的有效方法,是我国学者赵克勤^[9]在1989年提出的,2009年王

基金项目:国家自然科学基金(51769029);国家重点研发计划(2017YFC0404301);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2019G113)

作者简介:张志君(1995—),女,硕士研究生,研究方向为水资源开发与利用。E-mail: 1805602807@qq.com

通信作者:陈伏龙,教授。E-mail: cf1103@shzu.edu.cn

文圣等^[10]在此基础上提出了简单折线式的模糊集对分析法,已广泛应用于水资源安全^[11]、水资源承载力^[12]、水资源可持续利用^[13]、调水效益^[14]等方面的评价。目前对新疆水资源研究多关注于水资源承载力^[15]、水资源与社会经济发展协调度^[16]等方面,对新疆水资源安全评价研究较少。本文利用基于模糊集对分析的水安全评价方法对新疆水资源安全进行评价。

1 研究区概况

新疆位于我国西北地区,地理坐标 73°40'E ~ 96°18'E、34°25'N ~ 48°10'N,总面积 166 万 km²,具有气候干燥、降雨量少、水资源短缺等典型干旱区特征。新疆分为南疆(巴州、阿克苏地区、克州、喀什地区和和田地区)、北疆(乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉州、博州、伊犁州、塔城地区、阿勒泰地区和石河子市)和东疆(吐鲁番市和哈密市)3 部分,绿洲多位于沿河流域及盆地边缘,水资源受典型干旱区山地-绿洲-荒漠的自然因素和人文因素的双重影响^[16]。2016 年新疆的年降水量 229.7 mm,水资源总量为 1 093 亿 m³,年需水总量为 565.4 亿 m³,其中农业用水 533.4 亿 m³,占总需水量的 94.3%,比全国平均水平高 50.6%。生态环境用水率 1.1%,仅为全国平均值的 1/2。近年来,随着新疆城镇、工农业经济的不断发展,用水总量已经超过其红线控制值,地下水利用程度增加过快,水资源开发过度导致生态趋于恶化,水资源安全问题日益突出。

2 评价方法

基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价流程为:①建立新疆区域水资源安全评价指标体系;②确定各评价指标等级划分标准;③通过熵权法确定评价指标的权重;④采用模糊集对分析法求得单指标联系度;⑤将单指标联系度与准则层及目标层权重结合,得到准则层及目标层水资源安全评价综合联系度;⑥运用置信度准则与级别特征值法确定水资源安全的评价等级;⑦利用减法集对势确定需要调控的区域;⑧将评价结果与物元分析法及综合指数法进行比较分析。

2.1 建立评价指标体系

区域水资源安全评价指标体系是反映评价结果客观、真实的有效依据。评价指标的选取遵循可靠性、代表性和可获性等原则,采用定量与定性相结合的方法^[3],结合区域水资源现状,建立全面、综合反映新疆水资源安全状况的评价指标体系如表 1 所示(表中括号中数据为各指标权重,其中 $C_1 \sim C_4$ 、 C_8 、

C_{11} 、 C_{12} 、 $C_{14} \sim C_{17}$ 为越大越优型指标(效益型指标),其他为越小越优型指标(成本型指标)。本文将水资源安全评价指标体系分为目标层 A、准则层 B 和指标层 C,其中目标层 A 为“区域水资源安全”,共 16 个对象(即 $A_1 \sim A_{16}$,其中北疆 8 个、南疆 5 个、东疆 2 个及新疆整体),准则层分别为“水资源层 B_1 ”“社会经济层 B_2 ”“生态环境层 B_3 ”和“供需层 B_4 ”,指标层由指标 $C_1 \sim C_{18}$ 组成,见表 1。

表 1 新疆水资源安全评价指标体系及权重

Table 1 Regional water resources safety evaluation

index system and weight		
新疆水资源安全 A	水资源 B_1 (0.424)	产水模数 C_1 (0.048)
		人均水资源量 C_2 (0.091)
		地下水开采潜力系数 C_3 (0.075)
		径流系数 C_4 (0.069)
		水资源开发利用率 C_5 (0.079)
		地下水供水比例 C_6 (0.062)
	社会经济 B_2 (0.176)	人口密度 C_7 (0.028)
		灌溉水综合利用系数 C_8 (0.055)
		万元农业产值用水量 C_9 (0.045)
	生态环境 B_3 (0.179)	万元工业增加值用水量 C_{10} (0.048)
		生态用水率 C_{11} (0.057)
		森林覆盖率 C_{12} (0.058)
		污径比 C_{13} (0.031)
		中水回用率 C_{14} (0.033)
	供需 B_4 (0.221)	水资源供需比 C_{15} (0.072)
		供水模数 C_{16} (0.033)
		人均生活用水量 C_{17} (0.058)
		单位面积灌溉用水量 C_{18} (0.058)

2.2 确定指标等级标准

依据新疆水资源安全评价指标体系,借鉴与研究区相似地区的水资源安全评价成果^[3,17-19],将水资源安全评价等级划分为 5 级。其中 1 级(非常安全)表示被评价对象水资源系统自我修复能力较强,各项功能良好,基本无水危机及水灾害事件;2 级(安全)表示水资源系统自我修复能力良好,各项功能比较正常,水危机及水灾害事件较少;3 级(基本安全)表示水资源系统自我修复能力基本正常,各项功能大部分正常,发生部分水危机及水灾害事件;4 级(不安全)表示水资源系统自我修复能力和各项功能遭受较大破坏,水危机及水灾害事件增加;5 级(极不安全)表示水资源系统自我修复能力和各项功能遭受严重破坏,水危机及水灾害事件频率极高^[20],具体参数见表 2。

2.3 熵权法确定权重

权重是反映评价指标相对于评价对象的重要性程度,熵权法是一种可以尽量消除人为主观干扰的赋权法,参照文献^[21],采用熵权法确定评价指标权重的步骤如下:①选取 m 个评价对象, n 个指标,形成初始数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j =$

表2 新疆水资源安全评价等级划分标准

Table 2 Xinjiang Water Resources Safety Evaluation Grade Classification Standard

等级	$C_1/(万 m^3 \cdot km^{-2})$	C_2/m^3	C_3	C_4	$C_5/\%$	$C_6/\%$	$C_7/(人 \cdot km^{-2})$	C_8	C_9/m^3
1级	≥ 60	≥ 4000	≥ 1.4	≥ 0.4	≤ 15	≤ 0.10	≤ 30	≥ 0.7	≤ 80
2级	[35,60)	[2500,4000)	[1.2,1.4)	[0.25,0.4)	(15,40]	(0.10,0.30]	(30,150]	[0.6,0.7)	(80,120]
3级	[25,35)	[1000,2500)	[0.8,1.2)	[0.1,0.25)	(40,60]	(0.30,0.45]	(150,250]	[0.5,0.6)	(120,160]
4级	[15,25)	[500,1000)	[0.6,0.8)	[0.05,0.1)	(60,80]	(0.45,0.60]	(250,350]	[0.4,0.5)	(160,200]
5级	< 15	< 500	< 0.6	< 0.05	> 80	> 0.60	> 350	< 0.4	> 200

等级	C_{10}/m^3	$C_{11}/\%$	$C_{12}/\%$	C_{13}	$C_{14}/\%$	C_{15}	$C_{16}/(万 m^3 \cdot km^{-2})$	$C_{17}/(L \cdot d^{-1})$	$C_{18}/(m^3 \cdot hm^{-2})$
1级	≤ 40	≥ 40	≥ 40	≤ 1	≥ 60	≥ 1.2	≥ 5	≥ 200	≤ 4500
2级	(40,60]	[15,40)	[30,40)	(1,4]	[50,60)	[0.9,1.2)	[4,5)	[160,200)	(4500,6300]
3级	(60,90]	[10,15)	[20,30)	(4,7]	[40,50)	[0.6,0.9)	[3,4)	[120,160)	(6300,7500]
4级	(90,120]	[5,10)	[10,20)	(7,10]	[30,40)	[0.3,0.6)	[2,3)	[80,120)	(7500,9000]
5级	> 120	< 5	< 10	> 10	< 30	< 0.3	< 2	< 80	> 9000

1, 2, ..., n); ②将初始数据分成效益型指标和成本性指标,形成标准化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$; ③确定第 j 个评价指标的熵值; ④确定第 j 个评价指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - h'_j}{n - \sum_{j=1}^n h'_j} \quad (0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1) \quad (1)$$

式中: w_j 为第 j 个评价指标权重; n 为评价指标总数; h'_j 为第 j 个评价指标的熵值。

2.4 模糊集对分析法确定联系度

2.4.1 模糊集对分析法评价原理

在利用模糊集对分析法对水资源安全进行评价时,设由 n 个指标构成的评价对象集合为 $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 指标 x_j 第 k 级评价标准集合为 Z_k (k 为评价等级数, $k = 1, 2, \dots, K$), 则集合 A 与 Z_k 形成集对 $H(A, Z_k)$, 为了方便计算, 同时避免评价指标间作用差距较大引起的差异^[10-11], 将 Z_k 特定为指标 x_j 第 1 级标准构成的集合 Z_1 , 则集合 A 与 Z_1 构成集对 $H(A, Z_1)$, 指标 j 的联系度 $\mu_j^{[10]}$ 为

$$\mu_j = \mu_{A \sim Z_1} = a + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + cJ \quad (2)$$

其中 $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$

式中: a 为集对 $H(A, Z_1)$ 的同一度分量, 表示指标 x_j 隶属于 1 级标准的可能性; b_1, b_2, b_3 为集对 $H(A, Z_1)$ 的差异度分量, 表示指标 x_j 隶属于 2、3、4 级标准的可能性; c 为对立度分量, 表示指标 x_j 隶属于 5 级标准的可能性^[22]; I_1, I_2, I_3 为差异度分量系数; J 为对立度系数, 通常取 -1 ^[10]。

2.4.2 单指标联系度计算

区域水资源安全评价等级标准分 5 级, 一个门限值对应一个等级区间, 4 个门限值分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 , 等级门限边界的模糊性问题采用差异度分量处理。效益型指标 ($S_1 \geq S_2 \geq S_3 \geq S_4$) 和成本型指标 ($S_1 \leq S_2 \leq S_3 \leq S_4$) 联系度 μ_j 的计算公式^[10-11] 分别为

$$\mu_j = \mu_{A \sim Z_1} =$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 & x_j \geq S_1 \\ \frac{2x_j - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_j}{S_1 - S_2} I_1 & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_j < S_1 \\ \frac{2x_j - S_2 - S_3}{S_1 - S_3} I_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2x_j}{S_1 - S_3} I_2 & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_j < \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \frac{2x_j - S_3 - S_4}{S_2 - S_4} I_2 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_j}{S_2 - S_4} I_3 & \frac{S_3 + S_4}{2} \leq x_j < \frac{S_2 + S_3}{2} \\ \frac{2x_j - 2S_4}{S_3 - S_4} I_3 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_j}{S_3 - S_4} J & S_4 \leq x_j < \frac{S_3 + S_4}{2} \\ J & x_j < S_4 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\mu_j = \mu_{A \sim Z_1} =$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 & x_j \leq S_1 \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_j}{S_2 - S_1} + \frac{2x_j - 2S_1}{S_2 - S_1} I_1 & S_1 < x_j \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \frac{S_2 + S_3 - 2x_j}{S_3 - S_1} I_1 + \frac{2x_j - S_1 - S_2}{S_3 - S_1} I_2 & \frac{S_1 + S_2}{2} < x_j \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ \frac{S_3 + S_4 - 2x_j}{S_4 - S_2} I_2 + \frac{2x_j - S_2 - S_3}{S_4 - S_2} I_3 & \frac{S_2 + S_3}{2} < x_j \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ \frac{2S_4 - 2x_j}{S_4 - S_3} I_3 + \frac{2x_j - S_3 - S_4}{S_4 - S_3} J & \frac{S_3 + S_4}{2} < x_j \leq S_4 \\ J & x_j > S_4 \end{array} \right. \quad (4)$$

2.4.3 样本综合联系度计算

a. 准则层综合联系度。利用单指标联系度, 结合准则层内部各指标权重, 得准则层综合联系度^[23]:

$$\mu_{C \sim B} = \sum_{j=1}^s w_j a_j + \sum_{j=1}^s w_j b_{j,1} I_1 + \sum_{j=1}^s w_j b_{j,2} I_2 + \sum_{j=1}^s w_j b_{j,3} I_3 + \sum_{j=1}^s w_j c_j J \quad (5)$$

式中: s 是各准则层中指标个数; w_j 是准则层第 j 个

指标的权重。

b. 目标层综合联系度。依据单指标联系度, 结合指标层权重, 得目标层综合联系度^[10,23]:

$$\mu_{B-A} = \sum_{j=1}^n w_j a_j + \sum_{j=1}^n w_j b_{j,1} I_1 + \sum_{j=1}^n w_j b_{j,2} I_2 + \sum_{j=1}^n w_j b_{j,3} I_3 + \sum_{j=1}^n w_j c_j J \quad (6)$$

式中: n 是目标层中指标总数; w_j 是目标层第 j 个指标的权重。

2.5 确定评价等级

采用置信度准则确定水资源安全状态等级^[11,14], 判断隶属度等级的公式为

$$h_k = f_1 + f_2 + \dots + f_k > \lambda \quad (7)$$

其中

$$f_1 = \sum_{j=1}^n w_j a_j \quad f_2 = \sum_{j=1}^n w_j b_{j,1}$$

$$f_3 = \sum_{j=1}^n w_j b_{j,2} \quad f_4 = \sum_{j=1}^n w_j b_{j,3}$$

$$f_5 = \sum_{j=1}^n w_j c_j$$

式中: h_k 为属性测度; λ 为置信度, 取值范围通常为 $[0.5, 0.7]$ ^[11,23]; f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 为 5 个评价等级 (本文 $k=5$) 的联系度分量^[23], 对于给定的 λ , 当 $h_{k-1} \leq \lambda$, 且 $h_k > \lambda$ 时, 评价结果属于第 k 级, λ 取值越大, 评价结果越偏向于保守^[11]。

利用级别特征值法^[24] 能够克服模糊隶属度函数判别结果失真的缺点, 增强评价结果的合理性。结合式(5)、式(6), 得出对应水资源安全评价级别的特征值 g_k 为

$$g_k = f_1 + 2f_2 + 3f_3 + 4f_4 + 5f_5 \quad (8)$$

2.6 识别水资源安全调控区域

在集对分析理论中, 减法集对势是式(6) 样本综合联系度的伴随函数, 能将差异度分量 b 值按比率值法进行分配^[8], 根据金菊良等^[25] 提出的 n 元减法集对势函数 $s_f(u) = (a-c)(1+b_1+b_2+\dots+b_{k-2})$, 利用“均分原则”^[9], 将 $s_f(u)$ 划分为 5 个势级^[24], 当 $s_f(u) \in [-1.0, -0.6]$ 时为反势, $s_f(u) \in [-0.6, -0.2]$ 时为偏反势, $s_f(u) \in [-0.2, 0.2]$ 时为均势, $s_f(u) \in (0.2, 0.6]$ 时为偏同势, $s_f(u) \in (0.6, 1.0]$ 时为同势。处于反势或偏反势的区域, 是水资源安全调控的主要区域^[24-25]。

3 评价结果与分析

根据 2017 年《新疆统计年鉴》《石河子统计年鉴》及 2016 年《新疆水资源公报》等相关文献中的数据, 运用 Matlab 软件编程, 取 $\lambda = 0.5$, 依据置信度准则确定评价等级, 得到 2016 年新疆 15 个行政区

及新疆整体水资源安全准则层综合评价等级如表 3 所示, 其中水资源层和社会经济层各等级评价对象面积占新疆总面积比例见表 4。

表 3 新疆水资源准则层安全等级

Table 3 Xinjiang water resources standards layer safety level

行政区	评价等级			
	水资源层	社会经济层	生态环境层	供需层
乌鲁木齐市	5	3	4	2
克拉玛依市	5	2	3	2
吐鲁番市	4	4	4	3
哈密市	4	3	4	3
昌吉州	4	3	4	3
博州	3	3	4	2
巴州	2	3	4	3
阿克苏地区	3	4	4	3
克州	2	4	4	3
喀什地区	4	4	4	3
和田地区	2	5	4	3
伊犁州	1	3	4	2
塔城地区	3	3	4	2
阿勒泰地区	1	4	3	3
石河子市	5	3	4	3
新疆	3	3	3	3

表 4 水资源层和社会经济层等级分布区域占新疆总面积比例

Table 4 The proportion of water resources and socio-economic level distribution to the total area of Xinjiang

准则层	区域	各等级面积占比/%				
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
水资源层	北疆	10.69		7.28	4.49	1.46
	南疆		48.57	7.97	6.79	
	东疆				12.75	
社会经济层	北疆		0.51	23.41		
	南疆			29.14	19.03	15.17
	东疆			8.68	4.06	

由表 3 可得, 新疆整体的水资源准则层水资源安全评价等级均属于基本安全等级(3 级), 在生态环境层中, 北疆偏向于 4 级, 南疆、东疆属于 4 级; 在供需层中, 北疆偏向于 2 级, 南疆和东疆属于 3 级。

结合表 4 可见, 在水资源层中, 北疆、南疆水资源安全评价等级分级明显, 北疆分布在 1 级、3~5 级, 南疆偏向于 2 级, 东疆属于 4 级。在社会经济层中, 北疆水资源安全等级分布在 2、3 级, 南疆分布在 3~5 级, 东疆分布在 3、4 级。结合相关水资源论证的规划报告及实际社会经济发展情况, 该评价结果与实际情况较为符合。

结合模糊集对分析方法评价步骤, 利用置信度准则法、级别特征值法得出新疆水资源目标层的水资源安全评价等级, 并用减法集对势法进行空间诊断分析, 结果见表 5。

表5 新疆水资源安全评价等级及减法集对势值

Table 5 Xinjiang water resources safety evaluation level and subtraction set against potential values

行政区	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	置信度准则法评价等级	级别特征值法评价价值	减法集对势值
乌鲁木齐市	0.181	0.365	0.506	0.679	1.000	3	3.270	-0.170(均势)
克拉玛依市	0.285	0.411	0.575	0.692	1.000	3	3.036	-0.040(均势)
吐鲁番市	0.110	0.183	0.403	0.508	1.000	4	3.794	-0.366(偏反势)
哈密市	0.221	0.293	0.400	0.538	1.000	4	3.549	-0.266(偏反势)
昌吉州	0.210	0.357	0.552	0.599	1.000	3	3.282	-0.191(均势)
博州	0.349	0.436	0.686	0.776	1.000	3	2.753	0.116(均势)
巴州	0.304	0.480	0.609	0.652	1.000	3	2.955	-0.048(均势)
阿克苏地区	0.235	0.314	0.458	0.524	1.000	4	3.469	-0.241(偏反势)
克州	0.397	0.478	0.599	0.656	1.000	3	2.870	0.054(均势)
喀什地区	0.159	0.226	0.472	0.577	1.000	4	3.565	-0.244(偏反势)
和田地区	0.315	0.408	0.522	0.617	1.000	3	3.138	-0.074(均势)
伊犁州	0.477	0.582	0.704	0.806	1.000	2	2.433	0.306(偏同势)
塔城地区	0.251	0.475	0.703	0.717	1.000	3	2.855	-0.033(均势)
阿勒泰地区	0.419	0.494	0.667	0.812	1.000	3	2.609	0.241(偏同势)
石河子市	0.125	0.247	0.397	0.602	1.000	4	3.630	-0.322(偏反势)
新疆	0.358	0.404	0.580	0.736	1.000	3	2.923	0.096(均势)

由表5可知,新疆水资源安全等级属于3级,北疆分布在2~4级,南疆分布在3、4级,东疆属于4级。依据置信度准则判断水资源安全等级,位于同一个等级, h_k 越大安全程度越高,属于3级由高到低的顺序为:塔城、博州、阿勒泰、巴州、克州、克拉玛依、昌吉、和田、乌鲁木齐;属于4级由高到低的顺序为:吐鲁番、阿克苏、哈密、喀什、石河子。级别特征值法判断出伊犁水资源安全等级最优(2级),吐鲁番市水资源安全等级最差(4级),其余地区评价结果大体相同。由减法集对势判断出吐鲁番、哈密、喀什、阿克苏、石河子5个地区处于偏反势,是区域水资源安全调控的主要对象。

将本文综合评价结果与物元分析法^[4]及综合指数法^[7]的评价结果进行比较分析,结果见表6。本文基于模糊集对分析法的评价结果与物元分析法相比有14个相同,有2个相差1级;与综合指数法相比,评价结果有12个相同,有4个相差1级,3种评价方法的评价结果相近,表明模糊集对分析法的评价结果具有合理性。

4 结论

a. 新疆整体水资源安全状况属于基本安全等级,水资源安全等级空间分布上北疆最好、南疆其次,东疆最弱。减法集对势法识别出需要重点调控的5个地区是吐鲁番、哈密、喀什、阿克苏、石河子,与目标层评价结果较为符合,减法集对势法能较为简便、直观地识别出水资源安全的脆弱性样本。

b. 新疆水资源安全等级空间分布上,呈现南、北强东弱格局,社会经济层中呈现北、东强南弱格局,生态环境层普遍处于不安全水平,供需状况基本满足要求。

表6 3种评价方法评价结果比较

Table 6 Comparison of evaluation results of three evaluation methods

行政区	评价等级		
	模糊集对分析法	物元分析法	综合指数法
乌鲁木齐市	3	3	3
克拉玛依市	3	3	3
吐鲁番市	4	4	4
哈密市	4	4	3
昌吉州	3	3	3
博州	3	3	3
巴州	3	3	3
阿克苏地区	4	4	3
克州	3	2	4
喀什地区	4	4	4
和田地区	3	3	3
伊犁州	2	2	2
塔城地区	3	2	3
阿勒泰地区	3	3	3
石河子市	4	4	3
新疆	3	3	3

c. 基于模糊集对分析的水资源安全评价方法与物元分析法和综合指数法评价结果大体相同,应用于干旱区水资源安全评价具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 刘昌明,王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报,2003,18(5):635-644. (LIU Changming, WANG Hongrui. An analysis of the relationship between water resources and population-economy-society-environment [J]. Journal of Natural Resources,2003,18(5):635-644. (in Chinese))
- [2] 闵庆文. 论西北地区的水资源安全:问题与对策[J]. 中国人口·资源与环境,2004,14(1):97-101. (MIN Qingwen. Water security in northwest China: problems and

- countermeasures [J]. China Population Resources and Environment, 2004, 14(1): 97-101. (in Chinese))
- [3] 凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 基于 AHP 和模糊综合评判的玛纳斯河流域水资源安全评价[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 989-994. (LING Hongbo, XU Hailiang, QIAO Mu, et al. Appraisal of water resource security in manasi river basin by analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 989-994. (in Chinese))
- [4] 刘邦贵, 刘永强, 王浩, 等. 基于物元分析法的区域水资源安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 100-103. (LIU Banggui, LIU Yongqiang, WANG Hao, et al. Evaluation of regional water security based on matter element analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 100-103. (in Chinese))
- [5] 曹永强, 邢晓森, 伊吉美, 等. 投影寻踪技术在瓦房店市水资源安全评价中的应用[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 5-7. (CAO Yongqiang, XING Xiaosen, YI Jimei, et al. Application of projection pursuit technique in water security assessment of Wafangdian City [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 5-7. (in Chinese))
- [6] 龚巧灵, 官冬杰. 基于 BP 神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 292-299. (GONG Qiaoling, GUAN Dongjie. Study on water resources security evaluation of Chongqing section of Three Gorges Reservoir based on BP neural network [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 292-299. (in Chinese))
- [7] 陆建忠, 崔肖林, 陈晓玲. 基于综合指数法的鄱阳湖流域水资源安全评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 212-218. (LU Jianzhong, CUI Xiaolin, CHEN Xiaoling. Assessment of water resource security in Poyang Lake watershed based on composite index method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2): 212-218. (in Chinese))
- [8] 卢敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 505-508. (LU Min, ZHANG Zhanyu, DAN Yuezhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(5): 505-508. (in Chinese))
- [9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 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. (WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing, et al. A new approach to water resources system assessment: set pair analysis method [J]. Science in China: Series E, 2009, 39(9): 1529-1534. (in Chinese))
- [11] 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠. 模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 209-214. (WANG Hongwei, ZHANG Xin, QIU Junnan. Application of fuzzy set pair analysis method in safety evaluation of water resources [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(10): 209-214. (in Chinese))
- [12] 张欣, 陈华伟, 仕玉治, 等. 基于集对分析的黄河三角洲东营市水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 17-21. (ZHANG Xin, CHEN Huawei, SHI Yuzhi, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Dongying City in Yellow River Delta based on set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 17-21. (in Chinese))
- [13] 尹志杰, 管玉卉, 胡晓雪. 区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 28-31. (YIN Zhijie, GUAN Yuhui, HU Xiaoxue. Set pair analysis model for assessment of regional water resources sustainable utilization system [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 28-31. (in Chinese))
- [14] 王栋, 梁忠民, 常文娟, 等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 35-40. (WANG Dong, LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, et al. Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 35-40. (in Chinese))
- [15] 段新光, 栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(增刊1): 119-122. (DUAN Xinguang, LUAN Fangfang. Evaluation of Xinjiang water resources carrying capacity based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(Sup1): 119-122. (in Chinese))
- [16] 吴业鹏, 袁汝华. 丝绸之路经济带背景下新疆水资源与经济社会协调性评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 60-66. (WU Yepeng, YUAN Ruhua. Evaluation of coordination between water resources and economic and social development in Xinjiang in context of Silk Road Economic Belt [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 60-66. (in Chinese))
- [17] 张晓, 董宏志. 吐鲁番盆地平原区地下水潜力评价[J]. 地下水, 2017, 39(2): 18-20. (ZHANG Xiao, DONG Hongzhi. Evaluation of groundwater potential in plain area of Turpan Basin [J]. Underground Water, 2017, 39(2): 18-20. (in Chinese))
- [18] 蒋汝成, 顾世祥. 基于水贫困指数及 MSCS-SVM 模型的云南省水安全评价[J]. 水利经济, 2018, 36(5): 7-12. (JIANG Rucheng, GU Shixiang. Water safety assessment of Yunnan Province based on water poverty index and MSCS-SVM Model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5): 7-12. (in Chinese))

(下转第 78 页)

- 及其内源负荷[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1537-1551. (DU Yiheng, LIU Cheng, CHEN Kaining, et al. Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6):1537-1551. (in Chinese))
- [17] 薛培英,赵全利,王亚琼,等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统重金属污染分布特征[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1525-1536. (XUE Peiyong, ZHAO Quanli, WANG Yaqiong, et al. Distribution characteristics of heavy metals in sediment-submerged macrophyte-water systems of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6):1525-1536. (in Chinese))
- [18] 蔡艳洁,张恩楼,刘恩峰,等. 云南阳宗海沉积物重金属污染时空特征及潜在生态风险[J]. 湖泊科学,2017,29(5):1121-1133. (CAI Yanjie, ZHANG Enlou, LIU Enfeng, et al. Spatio-temporal characteristics of heavy metal pollution and potential ecological risk in the sediments of Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5):1121-1133. (in Chinese))
- [19] 马培,鲍锦磊. 沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价[J]. 水资源保护,2018,34(2):61-67. (MA Pei, BAO Jinlei. Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):61-67. (in Chinese))
- [20] KLEEBERG A, KOHL J G. Assessment of the long-term effectiveness of sediment dredging to reduce benthic phosphorus release in shallow Lake Müggelsee (Germany) [J]. Hydrobiologia, 1999, 394(3):153-161.
- [21] NÜMBERG G K, TARVAINEN M, VENTELÄ A M, et al. Internal phosphorus load estimation during biomanipulation in a large polymictic and mesotrophic lake [J]. Inland Waters, 2015, 2(3):147-162.
- [22] JEPPESEN E, MEERHOFF M, JACOBSEN B A, et al. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation-the successful strategy varies with lake size and climate [J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1):269-285.
- [23] LEIVUORI M, NIEMIST L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. Chemosphere, 1995, 31(8):3839-3856.
- [24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [25] 廖启林,刘聪,许艳,等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, 38(5):1363-1378. (LIAO Qilin, LIU Cong, XU Yan, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2011, 38(5):1363-1378. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-03-13 编辑:熊水斌)

(上接第 58 页)

- [19] 宋培争,汪嘉杨,刘伟,等. 基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J]. 自然资源学报,2016,31(5):886-893. (SONG Peizheng, WANG Jiayang, LIU Wei, et al. Water resources security evaluation model based on PSO optimized logistic curve [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5):886-893. (in Chinese))
- [20] 孙智慧. 北京地区水资源安全研究[D]. 北京:中央财经大学,2016.
- [21] 鲁婷婷,俞淞,王红瑞,等. 基于熵权的集对分析在地下水质量评价中的应用[J]. 水利经济,2013,31(1):34-37. (LU Tingting, YU Song, WANG Hongrui, et al. Application of set pair analysis based on entropy weight in groundwater quality evaluation [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013, 31(1):34-37. (in Chinese))
- [22] 潘争伟,吴成国,金菊良. 水资源系统评价与预测的集对分析评价方法[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [23] 匡舒雅,李天宏. 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):93-101. (KUANG Shuya, LI Tianhong. Application of five-element connection number to assessment of ecological waterway in the lower reaches of Yangtze River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5):93-101. (in Chinese))
- [24] 金菊良,沈时兴,郦建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2018, 39(1):1-9. (in Chinese))
- [25] 金菊良,张浩宇,陈梦璐,等. 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J]. 灾害学,2019,34(1):1-7. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, CHEN Menglu, et al. Evaluation and diagnosis of agricultural drought vulnerability based on grey correlation and connection number coupling [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1):1-7. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-03-18 编辑:熊水斌)