

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.009

基于级差最大化组合赋权法的地下水功能评价

谢纪强¹, 游进军¹, 姜纪沂²

(1. 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;

2. 防灾科技学院地球科学学院, 北京 101601)

摘要:针对地下水功能评价中单独采用主观赋权法或客观赋权法存在的问题, 结合二者的优点, 采用基于主观赋权的层次分析法与客观赋权的熵权法相结合的级差最大化组合赋权法评价地下水功能, 并通过计算不同赋权方法权重结果与平均值的相对偏差来衡量级差最大化组合赋权法的准确性。将该方法应用于伊犁河谷西北部平原区浅层地下水功能评价, 评价结果基本符合评价区实际情况, 验证了该评价方法在地下水功能评价中的可行性。

关键词:地下水功能评价; 级差最大化法; 组合赋权法; 层次分析法; 熵权法; 伊犁河谷

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0054-06

Using level difference maximization method to calculate combined weights for groundwater function evaluation //

XIE Jiqiang¹, YOU Jinjun¹, JIANG Jiyi² (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China)

Abstract: In view of the problems of using the subjective weighting method or objective weighting method alone in groundwater function evaluation and with combination of the advantages of the two methods, the level difference maximization method, incorporating the analytic hierarchy process based on subjective weighting and the entropy weight method based on objective weighting, was used to calculate the combined weights for evaluation of the groundwater function in this study. Relative deviations of calculated weights from the average values of different weighting methods were calculated to evaluate the accuracy of the level difference maximization method. The method was applied to evaluate the shallow groundwater function in the northwest plain area of the Ili River Valley. The evaluation results basically accord with the actual situation of the evaluation area, proving the feasibility of this method in evaluating groundwater function.

Key words: groundwater function evaluation; level difference maximization method; combination weighting method; analytic hierarchy process; entropy weight method; Ili River Valley

20 世纪以来, 城镇化、人口增长以及社会经济迅猛发展, 人们更加重视地下水的资源供给功能而忽视了地下水对生态以及地质环境的支撑作用^[1], 过度开采地下水引发了一系列生态和地质环境问题。地下水功能评价的目的是充分发挥地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能的整体最佳效益, 实现地下水可持续利用, 有效保护生态及地质环境, 为地下水管理提供科学依据。

近年来地下水功能评价工作逐步得到重视, 相关研究和实际工作逐渐增多。张光辉等^[2]首先提

出区域地下水功能及可持续利用评价理论。王金哲等^[3,4]提出了地下水功能评价指标选取原则和针对评价指标标准化过程中异常数据的识别及处理方法, 为地下水功能评价指标体系的建立提供了切实可行的方法。聂振龙等^[5]开发了地下水功能评价可视化平台, 实现评价过程的自动化和可视化。随着研究的深入和应用需求增加, 地下水功能评价形成了较为规范的技术体系, 中国地质调查局于 2006 年发布《地下水功能评价与区划技术要求》(以下简称《技术要求》), 提出了地下水功能评价的要求和

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407705); 国家自然科学基金(52079143)

作者简介: 谢纪强(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: xiejiqiang97@163.com

通信作者: 游进军(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: youjj@iwhr.com

方法,并先后在我国华北、西北和南方等地区得到应用^[6-10],取得显著成效。

指标权重的确定是地下水功能评价的重要内容,对评价结果具有重要影响。权重确定方法包括主观赋权法和客观赋权法,但两者都有一定片面性。现有地下水功能评价的权重确定主要采用主观赋权的层次分析法^[11-14],主观赋权法在确定权重的过程中可以充分考虑专家意见,但也可能会因主观随意性导致评价结果失真。客观赋权法确定权重具有较强的数学理论依据,但难以充分考虑决策者的评价需求和意向,导致评价结果与实际需求存在差异^[15]。目前地下水功能评价中针对权重确定方法及其效果分析的研究较少,为兼顾对指标重要性的判断,充分利用指标数据信息,有效结合主观赋权法与客观赋权法的优点,本文采用级差最大化法计算组合权重,通过计算各赋权方法(主观赋权的层次分析法、客观赋权的熵权法、组合赋权的级差最大化法)的权重结果与权重平均值的相对偏差来衡量各赋权方法的准确性,并以伊犁河谷西北部平原区浅层地下水功能评价为例验证级差最大化组合赋权法(以下简称级差最大化法)的可行性,以期对相关研究和管理提供参考。

1 评价方法

1.1 地下水功能评价步骤

根据《技术要求》,地下水功能评价步骤主要包括①根据评价区地下水系统的水文地质特性划分评价单元;②分析和建立评价区地下水功能评价指标体系,依据主导性原则、可度量原则、可操作性原则,从《技术要求》提供的指标中集中筛选出适合评价区的评价指标体系;③计算评价单元各评价指标值,包括指标值无量纲化及归一化处理;④确定评价指标权重;⑤计算综合评价值,根据功能评价等级标准(表1),为评价结果划分评价等级;⑥根据各评价单元评价等级,利用 ArcGIS 绘制出评价区地下水功能评价结果图。

表 1 地下水功能评价等级

Table 1 Groundwater function evaluation grades

等级	系统综合评价值	功能层评价值
弱	[0.0,0.2)	[0.0,0.17)
较弱	[0.2,0.4)	[0.17,0.34)
一般	[0.4,0.6)	[0.34,0.67)
较强	[0.6,0.8)	[0.67,0.84)
强	[0.8,1.0]	[0.84,1.00]

1.2 评价指标赋权方法

指标权重确定方法一般分为主观赋权法、客观赋权法及主客观组合赋权法。主观权重实质是一种

重要性权重,根据评价者对各指标重要性的判断赋予指标权重。主观赋权法包括层次分析法、专家调查法等。客观权重实质上是一种信息量权重^[16],根据评价指标所包含的信息量的多少(区分度的高低)来确定的一种统计权重。一般来说,某评价指标在各评价对象之间所表现出来的差异程度越大,说明该指标中的“分辨信息”越多,赋予的权重可以更大。客观赋权法包括变异系数法、主成分分析法、因子分析法、熵权法等^[17]。由于主观赋权和客观赋权法各自存在不足,组合赋权法逐步得到研究和应用,组合赋权法包括加法合成法、乘法合成法、级差最大化法、客观修正主观法等^[18]。

1.3 级差最大化法

主客观组合赋权法是近年来使用较多的赋权方法,其中,级差最大化法物理意义明确且便于计算,因此本文选用其计算组合权重。具体组合方式是主观赋权法选用层次分析法,客观赋权法选用熵权法,通过级差最大化法计算得到评价指标的组合权重。

级差最大化法的实质是将主客观赋权法所得的权重最大值和最小值作为组合权重的上下限约束,主要计算步骤^[19]如下:

a. 计算单方法权重。假设有 m 种赋权方法对 k 个评价指标进行赋权,可得到权重矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{km} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $a_{ij}(i=1,2,\cdots,k;j=1,2,\cdots,m)$ 为赋权方法 j 对评价指标 i 的赋权。

b. 计算组合权重区间范围。由权重矩阵 A 可以确定组合权重 $a=(a_1,a_2,\cdots,a_k)$ 的区间范围 $a_i\in[a_i^-,a_i^+]$,其中 a_i 为评价指标 i 的组合权重, $a_i^+=\max(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{im})$, $a_i^-=\min(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{im})$ 。

c. 级差最大化组合权重优化模型计算。通过最大化评价结果的方差,得到组合权重:

$$\max s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k [a_i(x_i - \bar{x})]^2 \tag{2}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^k a_i = 1 \\ a_i^- \leq a_i \leq a_i^+ \end{cases} \tag{3}$$

式中: s^2 为综合评价值方差; x_i 为评价指标 i 的值; $\bar{x}$ 为评价指标 i 的平均值。

d. 计算各评价单元地下水功能综合评价值:

$$R_n = \sum_{i=1}^k a_i x_{in} \tag{4}$$

式中: R_n 为单元 n 的综合评价价值; x_{in} 为评价指标 i 在单元 n 中的值。

2 实例应用

2.1 评价区概况

伊犁河谷盆地位于新疆西天山支脉——乌孙山北麓、伊犁河以南,海拔 530 ~ 3 480 m。该区域属于大陆性北温带温和气候,降水较少,蒸发量大;地势南高北低,南部为山区,中部为倾斜平原,北部为伊犁河冲积平原。本文评价范围为伊犁河谷西北部平原区浅层地下水分布区域,面积为 2 132 km²。评价区在新构造运动的影响下,沉积了巨厚的第四系松散物,为第四系松散岩类孔隙水提供了储存空间,单一卵石层厚度可达 600 m,形成了丰富的第四系孔隙水,水质良好。沿伊犁河往西到中哈边界一带,土壤颗粒变细,含水层变为潜水、承压水多层结构,水量丰富,水质较好;中部地区上覆砾石层中赋存松散岩类孔隙水,主要接受降水入渗补给,水量较为贫乏;南部降水量较大,降水渗入补给较好,富水性较好,矿化度较低。根据评价结果,地下水总补给量 4.41 亿 m³,可开采量 2.62 亿 m³。现状地下水实际开采量 0.93 亿 m³,占地下水可开采量的 36.6%。存在的水问题主要包括水资源衰减、用水需求增长、供需矛盾加剧、地下水超采和水污染日趋严重。

2.2 评价单元划分

根据《技术要求》,利用 ArcGIS 将评价区域按 2 km × 2 km 大小剖分为 535 个网格(评价单元),并建立网格中心点文件作为评价指标值的载体。

2.3 评价指标体系构建

根据《技术要求》及指标选取原则^[6,10],结合评价区实际情况选取评价指标。其中,资源功能主要由补给量、储存量、可利用量、水质指标表征;生态功能主要由表层土类型、潜水水位埋深及潜水矿化度指标表征;由于评价区内没有明显与地下水相关的地质环境问题,地质环境功能选取地下水质量与水位关联度和地下水补给变率与水位变差比指标表征。综上所述,从资源、生态、地质环境 3 个方面分 3 个层次选取 14 个评价指标,利用 2014 年《伊犁河谷水文地质勘察报告》所提供的电子图件及实测数据,根据各项指标与各属性层、功能层的从属关系,建立分层地下水功能评价指标体系,如图 1 所示。其中,各定量指标计算公式参考《技术要求》;各定性指标根据《技术要求》所提供的分级标准及评价区域实际情况赋值。

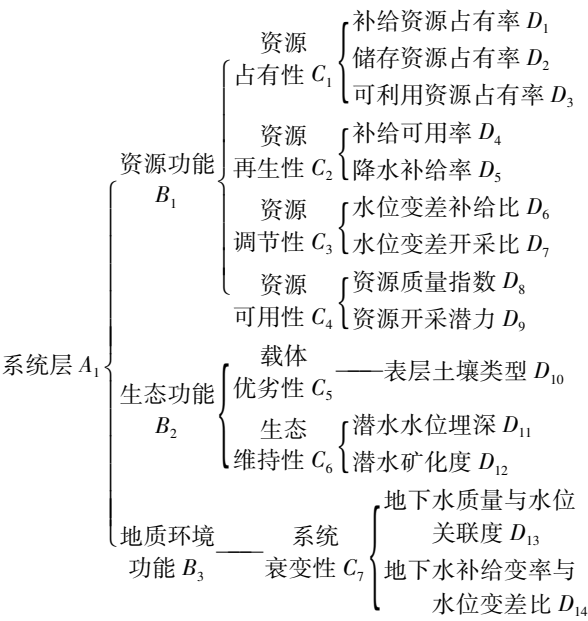


图 1 地下水功能评价指标体系

Fig. 1 Groundwater function evaluation index system

2.4 评价指标权重计算结果

地下水功能评价中,由于缺少数据只能定性表示的指标适合使用主观赋权法,充分发挥专家经验的优势,给出较合理的权重;可以定量计算的指标既可以使用主观赋权法,也可以使用客观赋权法,客观赋权法可以充分利用指标数据本身所包含的信息量确定权重。本文选取的评价指标为可以定量计算的指标,均使用两类赋权法计算指标权重,并利用级差最大化法计算组合权重。主观赋权法采用基于 5/5 ~ 9/1 标度法^[16]的层次分析法^[20-22],客观赋权法采用熵权法^[23-24],级差最大化法计算评价指标组合权重时,取 $m = 2, k = 14$,指标权重计算结果见表 2。

每种赋权方法得到的结果都是对合理权重的一种估计。假设每种赋权方法计算得到的结果都是相对合理的,每种赋权结果应分布在合理权重的两侧。我们取 3 种权重计算结果(层次分析法、熵权法、级差最大化法)的平均值作为合理权重的近似值,利用各赋权方法的权重结果与平均值的相对偏差来衡量赋权方法的准确性。由表 2 可知,层次分析法计算权重结果的偏差范围 7% ~ 53%,最大偏差对应指标为 D_1 ;熵权法结果偏差范围为 4% ~ 100%,最大偏差对应指标为 D_7 ;级差最大化法结果偏差范围为 4% ~ 51%,最大偏差对应指标为 D_7 。可以看出,级差最大化法所得权重结果偏差范围最小,且累计偏差结果最小。因此,级差最大化法得到的结果更加接近合理权重,由此方法得到的综合评价结果也更加准确。

表 2 地下水功能评价指标权重的层次分析法、熵权法和级差最大化法计算结果比较
Table 2 Comparison of calculated results of analytic hierarchy process, entropy weight method, and level difference maximization method for groundwater function evaluation index weights

指标	权重				相对偏差的绝对值/%		
	层次分析法	熵权法	级差最大化法	平均值	层次分析法	熵权法	级差最大化法
D_1	0.031	0.084	0.084	0.066	53	27	27
D_2	0.044	0.082	0.044	0.057	23	44	23
D_3	0.077	0.065	0.075	0.072	7	10	4
D_4	0.053	0.031	0.053	0.046	15	33	15
D_5	0.023	0.040	0.023	0.029	21	38	21
D_6	0.018	0.058	0.018	0.031	42	87	42
D_7	0.018	0.074	0.018	0.037	51	100	51
D_8	0.162	0.114	0.162	0.146	11	22	11
D_9	0.162	0.093	0.162	0.139	17	33	17
D_{10}	0.084	0.050	0.050	0.061	38	18	18
D_{11}	0.127	0.080	0.080	0.096	32	17	17
D_{12}	0.068	0.077	0.077	0.074	8	4	4
D_{13}	0.053	0.084	0.114	0.094	44	11	21
D_{14}	0.080	0.082	0.040	0.053	51	55	25
累计偏差					412	498	296

2.5 评价结果与分析

利用式(4)计算各评价单元地下水综合功能评价价值,并将各功能及综合功能评价结果输入各评价单元点。根据《技术要求》给出的评价分级标准(表1)分别对各评价单元分级,利用 ArcGIS 绘制伊犁河谷西北部平原区浅层地下水各功能及综合功能评价结果,如图 2 所示,各功能分级面积占比见表 3。

由图 2(a)可以看出,资源功能强的区域主要分布在评价区西部及南部,水量丰富,开采程度较低,南部靠近山区,降雨入渗补给条件较好,水质较好,为Ⅱ类水,适合集中开采;资源功能较强的区域主要分布在评价区中部及北部伊犁河沿岸,水量较为丰富,水质较好,为Ⅱ、Ⅲ类水,适合适度开采;资源功

表 3 各功能评价分级面积占比
Table 3 Area proportions for different function evaluation grades

功能	各功能评价分级面积占比/%				
	弱	较弱	一般	较强	强
资源功能	7.78	10.90	31.42	26.85	23.05
生态功能	16.58	36.00	27.42	17.28	2.71
地质环境功能	0.00	49.64	8.31	36.27	5.77
综合功能	11.45	13.44	34.33	26.94	13.84

能一般的区域分布在评价区东西两侧;资源功能弱及较弱的区域主要分布在人类活动剧烈的中部乡镇区,由于人类的开发利用,资源功能由强转弱,水量及水质均有所下降,不宜大规模开采。

由图 2(b)可以看出,生态功能强及较强的区域

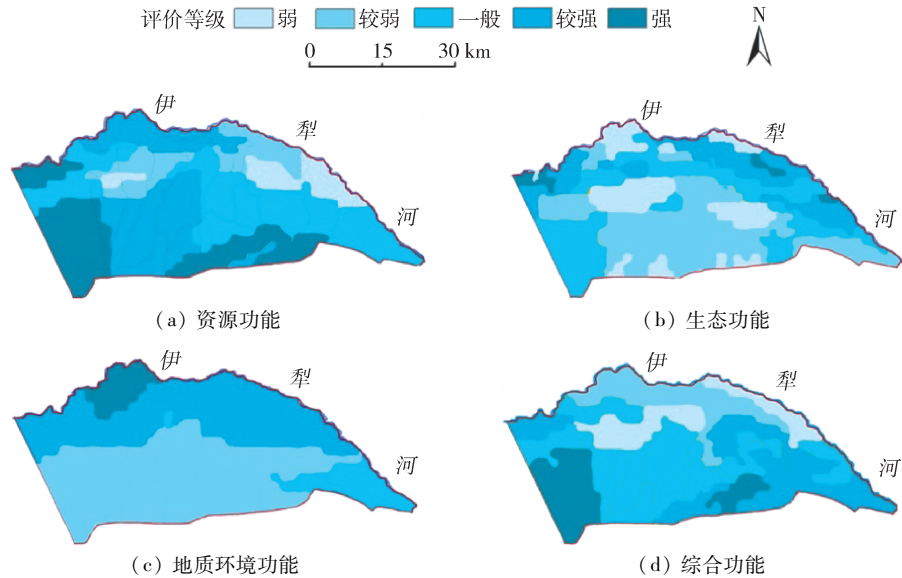


图 2 伊犁河谷西北部平原区浅层地下水功能评价结果
Fig. 2 Evaluation results of shallow groundwater function in northwest plain area of Ili River Valley

呈条带状分布在评价区西北部及西部伊犁河沿岸,此处多为植被覆盖,需要地下水提供支撑,另外,伊犁河沿岸部分地区地下水埋深较浅,为0~5 m,易出现土地盐渍化,需要控制地下水位;生态功能弱及较弱的区域主要分布在评价区中部,该地区地下水位埋深为20~50 m,地下水生态维持功能不明显。

由图2(c)可以看出,地质环境功能强及较强的区域主要分布在伊犁河沿岸区域,该区域地下水系统对外界的响应程度较高,属于排泄区与径流区,地下水位埋深在5 m以内,补给、排泄地下水时水位变化较明显,不宜进行大规模开采;地质环境功能一般及较弱的区域主要分布在评价区中部及南部,该区域地下水对外界响应程度较低,径流条件好,属于补给区与径流区,可进行适当开采。

由图2(d)可以看出,地下水综合功能强的区域分布在平原区西部,地下水资源丰富,水质较好,开采潜力较大,资源功能强,生态功能较强,地质环境功能强;地下水综合功能较强的区域主要分布在西南部、少量分布在西北部,该区域资源功能强或较强,生态及地质环境功能较强、一般及较弱均有分布,情况比较复杂;地下水综合功能一般的区域分布在中部大部分地区,地下水资源功能一般,生态功能一般或较弱,地质环境功能强、较强或一般;地下水综合功能较弱的区域呈带状分布在北部以及东部伊犁河沿岸,地下水资源功能较弱,生态功能较强或一般,地质环境功能一般、较弱或弱;地下水综合功能弱的区域呈带状分布在中部人类活动聚集区。由此看出,伊犁河谷西北部平原区浅层地下水综合功能总体较好,弱及较弱的区域约占总面积的25%,强及较强的区域约占总面积的41%,评价区地下水开发利用潜力较高。但该区域地下水开发利用时要严格控制地下水开采规模和区域水位波动幅度,防止地下水系统衰退并进而引发的一系列生态和地质环境等问题,以确保地下水良性循环和维持健全的资源功能、生态功能和地质环境功能。

对比分析表明,评价结果与评价区实际情况基本符合,验证了级差最大化法评价结果的合理性,证实该方法可以较好地反映指标实际权重。

3 结 语

比较主观赋权的层次分析法、客观赋权的熵权法、组合赋权的级差最大化法赋权结果得出,级差最大化法得到的指标权重相对偏差最小,结果更加接近合理权重。

将级差最大化法应用于伊犁河谷平原区浅层地下水功能评价,结果符合评价区实际情况,说明该方

法适用于计算地下水功能评价指标权重。从评价结果中可以看出,平原区西部地下水综合功能强,地下水资源丰富,水质较好,开采潜力较大;平原区西南部地下水综合功能较强,可进行适度开采;平原区中部大部分地区地下水资源功能较弱,该区域要严格控制地下水开采强度,以确保地下水良性循环并维持健全的地下水功能。

参考文献:

- [1] 陈建生,张茜,马芬艳,等.长江三峡库区水渗漏引起的地下水污染问题讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):487-491. (CHEN Jiansheng, ZHANG Xi, MA Fenyan, et al. Discussion on groundwater pollution caused by leakage of the Three Gorges Reservoir on the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 487-491. (in Chinese))
- [2] 张光辉,申建梅,聂振龙,等.区域地下水功能及可持续利用性评价理论与方法[J]. 水文地质工程地质,2006(4):62-66. (ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, NIE Zhenlong, et al. Theory and methodology of regional groundwater function and sustainable utilization assessment in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(4): 62-66. (in Chinese))
- [3] 王金哲,张光辉,申建梅,等.地下水功能评价指标选取依据与原则的讨论[J]. 水文地质工程地质,2008(2):76-81. (WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, et al. Discussing foundation and principle on choosing evaluating index of groundwater function[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(2): 76-81. (in Chinese))
- [4] 王金哲,张光辉,申建梅,等.地下水功能评价指标标准化过程中的异常数据识别及处理[J]. 南水北调与水利科技,2007(5):94-96. (WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, et al. Singular date identify and dispose in evaluating groundwater function index standardization[J]. South to North Water Transfer and Water Science and Technology, 2007(5): 94-96. (in Chinese))
- [5] 聂振龙,张光辉,申建梅,等.地下水功能评价可视化平台的开发及应用[J]. 地球学报,2007(6):579-584. (NIE Zhenlong, ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, et al. The development and application of a visual software for groundwater function assessment[J]. Acta Geosciences, 2007(6): 579-584. (in Chinese))
- [6] 范伟.吉林省平原区地下水功能评价[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [7] 闫成云,聂振龙,张光辉,等.疏勒河流域中下游盆地地下水功能评价[J]. 水文地质工程地质,2007(3):41-45. (YAN Chengyun, NIE Zhenlong, ZHANG Guanghui, et al. Assessment of groundwater function in the middle and

- lower reaches of the Shulehe River Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007(3): 41-45. (in Chinese))
- [8] 何守阳,雷琨,吴攀,等. 贵州岩溶山区城镇化进程中地下水的资源功能评价[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2839-2850. (HE Shouyang, LEI Kun, WU Pan, et al. Evaluation on resources function of groundwater during urbanization in Karst region of Guizhou Province [J]. Earth Science, 2019, 44(9): 2839-2850. (in Chinese))
- [9] 杜金龙,靳孟贵,罗育池,等. 浅层地下水功能评价指标体系:以河南省平原岗区为例[J]. 水资源保护, 2007(6): 89-92. (DU Jinlong, JIN Menggui, LUO Yuchi, et al. Assessment index system for shallow groundwater function: a case study on the plain and hummock of Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2007(6): 89-92. (in Chinese))
- [10] 唐蕴,王研,唐克旺. 吐鲁番市浅层地下水功能区划分[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 16-21. (TANG Yun, WANG Yan, TANG Kewang. Functional division of shallow groundwater in Turpan City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 16-21. (in Chinese))
- [11] 张光辉,杨丽芝,聂振龙,等. 华北平原地下水的功能特征与功能评价[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 368-374. (ZHANG Guanghui, YANG Lizhi, NIE Zhenlong, et al. Assessment of groundwater function in North China Plain [J]. Resource Science, 2009, 31(3): 368-374. (in Chinese))
- [12] 孙才志,李秀明. 基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水功能评价[J]. 地理科学, 2013, 33(2): 174-180. (SUN Caizhi, LI Xiuming. Groundwater function assessment based on ArcGIS in the lower reach of the Liaohe River Plain [J]. Geoscience, 2013, 33(2): 174-180. (in Chinese))
- [13] 黄勇,祁永前,张健健,等. 柴达木盆地地下水功能评价[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 68-71. (HUANG Yong, QI Yongqian, ZHANG Jianjian, et al. Assessment of groundwater function in Qaidam Basin [J]. Yellow River, 2015, 37(7): 68-71. (in Chinese))
- [14] 肖攀,喻望,胡光明,等. 江汉-洞庭平原地下水功能评价与区划[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 6-11. (XIAO Pan, YU Wang, HU Guangming, et al. Assessment and zoning of groundwater function in Jianghan-Dongting Plain [J]. Yangtze River, 2017, 48(1): 6-11. (in Chinese))
- [15] 徐泽水,达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究[J]. 中国管理科学, 2002(2): 85-88. (XU Zeshui, DA Qingli. Study on method of combination weighting [J]. China Management Science, 2002(2): 85-88. (in Chinese))
- [16] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门:厦门大学, 2000.
- [17] 刘秋艳,吴新年. 多要素评价中指标权重的确定方法评述[J]. 知识管理论坛, 2017, 2(6): 500-510. (LIU Qiuyan, WU Xinnian. Review on the weighting methods of indexes in the multi-factor evaluation [J]. Knowledge Management Forum, 2017, 2(6): 500-510. (in Chinese))
- [18] 李刚,李建平,孙晓蕾,等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017, 29(12): 17-26. (LI Gang, LI Jianping, SUN Xiaolei, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighing and its rationality [J]. Management Review, 2017, 29(12): 17-26. (in Chinese))
- [19] 李刚,迟国泰. 级差最大化组合赋权的人的全面发展评价模型及实证[J]. 中国软科学, 2009(9): 147-155. (LI Gang, CHI Guotai. The comprehensive evaluation of all-round human development based on level difference maximization [J]. China Soft Science Magazine, 2009(9): 147-155. (in Chinese))
- [20] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese))
- [21] 游进军,赵帆,杨聪,等. 针对水资源配置评价的定量指标改进层次分析法研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 6-8. (YOU Jinjun, ZHAO Fan, YANG Cong, et al. Improved analytic hierarchy process for quantitative index of assessment on water resources allocation [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2010, 41(3): 6-8. (in Chinese))
- [22] 谢新民,李丽琴,周翔南,等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))
- [23] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(12): 99-103. (GUO Xianguang. Application of improved entropy method in evaluation of economic result [J]. System Engineering Theory and Practice, 1998(12): 99-103. (in Chinese))
- [24] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-13 编辑:施业)