

基于层次分析法的变权 PROMETHEE 模型在雨水利用评价中的应用

曾超¹, 杨侃¹, 刘朗², 梁永静¹, 杨堃¹, 朱子唯¹, 卞雨¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 句容水利农机局, 江苏 句容 212400)

摘要: 为了对不同区域的雨水利用现状进行综合评价,为“海绵城市”的建设提供科学依据,结合现有方法的不足之处,提出基于层次分析法的变权 PROMETHEE 模型。该模型通过确立雨水利用的 6 个评价指标,采用层次分析法确定初始权重,再对初始权重变权分析,建立 PROMETHEE 评价模型。运用该模型对云南省 4 个不同区域的雨水资源利用现状进行了综合评价,得到了优劣排序,结果显示,区域 2 的雨水利用现状最优,区域 3 和区域 1 次之,区域 4 最差。同时将提出的模型的评价结果与现有的两种方法进行比较,体现了该模型的合理性和优越性。此外也给出了 4 个不同区域给出相应的改善建议,对区域后续的雨水资源利用的改进具有指导意义。

关键词: 雨水利用; 层次分析法; PROMETHEE 法; 变权分析

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)03-0124-06

Application of variable weight PROMETHEE model based on analytic hierarchy process in rainwater utilization evaluation

ZENG Chao¹, YANG Kan¹, LIU Lang², LIANG Yongjing¹, YANG Kun¹, ZHU Ziwei¹, BIAN Yu¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jurong Agricultural Water Conservancy Bureau, Jurong 212400, China)

Abstract: In order to provide a scientific basis for the construction of “sponge city”, combined with the shortcomings of the existing methods, this paper proposes a variable weight PROMETHEE model based on AHP (Analytic Hierarchy Process) to comprehensively evaluate the present situation of rainwater utilization in different regions. Based on the six evaluation indexes of rainwater utilization, the model determines the initial weight with AHP and uses variable weight analysis. Then, the PROMETHEE evaluation model is established to evaluate the present situation of rainwater resources utilization in four different regions of Yunnan Province synthetically, and the advantages and disadvantages were ranked. The results show that the utilization of rainwater in region 2 is the best, followed by region 3 and region 1, and region 4 is the worst. At the same time, the evaluation results of the model proposed in this paper are compared with the existing two methods, which reflects the rationality and superiority of the model. In addition, this paper also gives some suggestions for improvement in four different regions, which is instructive for the improvement of subsequent rainwater resources utilization in these regions.

Key words: rain water utilization; analytic hierarchy process; PROMETHEE method; variable weight analysis

1 研究背景

水资源短缺是 21 世纪人类面临的最大的资源问题,如何合理高效地利用现有的水资源是专家学

者一直致力研究方向。雨水资源作为一种较为优质的水资源,容易收集利用,而且污染小,可用作农业灌溉用水、生活用水、工业用水、生态用水以及市政用水,具有涵养水源地、城市防洪和改善生态环境

收稿日期:2017-10-16; 修回日期:2017-11-30

基金项目:云南省水利厅科技项目“水资源综合节水与非常规水源利用研究”;国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2012CB417006);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAC56B03)

作者简介:曾超(1995-),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者:杨侃(1965-),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水资源规划与管理。

等功能,尤其在水资源匮乏的地区,雨水资源更是一种关键的水资源。总体来看,合理高效地利用雨水资源具有良好的生态、社会以及经济效益。当前,国家大力推进“海绵城市”的建设,“海绵城市”的重点就是如何合理地利用雨水资源,所以进行区域雨水利用的评价是必要的。

目前并没有一种完美的评价雨水资源利用现状的公式或方法,常用的方法有模糊评价法^[1]、物元分析法^[2]、集对分析法^[3]、灰色关联分析法^[4]、综合指数法^[5]等,这些方法多数用层次分析法确定权重,而层次分析法的主观性较大,若某一较差的指标的权重很小,那么该指标很可能会被较好的指标中和掉,有失评价的公平性。此外,这些方法计算大多比较繁杂,不容易被决策者所理解和接受。本文在参考文献[6]、[7]、[8]和[9]的基础上,提出一种以层次分析法为基础的变权 PROMETHEE 评价方法,相比其他方法简单易行,不受评价等级的约束,同时变权分析保证了评价的公平性。本文将该方法运用到云南省4个不同区域,得出它们的优劣次序,提出相应的改善意见。

2 雨水资源利用评价指标的确立

影响雨水资源利用效率的因素有很多,在确立评价指标之前需要对这些因素进行筛分,尽量选取能够从不同角度反映雨水利用现状的因素,从而确立雨水利用评价指标。本文综合各类文献后从生态、生产、生活三方面选取的6个指标如下:

(1) 雨水资源控制率 I1: 年人工积蓄雨水总量/多年平均区域降雨量(%);

(2) 农业灌溉用水中雨水所占比例 I2: 雨水灌溉的耕地面积/区域内耕地总面积(%);

(3) 生活用水中雨水所占比例 I3: 生活用水中雨水用量/区域内生活总用水量(%);

(4) 工业企业用水中雨水所占比例 I4: 工业企业用水中雨水用量/区域内工业总用水量(%);

(5) 生态环境用水中雨水所占比例 I5: 生态用水量中的雨水用量/区域内生态总用水量(%);

(6) 市政用水中雨水所占比例 I6: 市政用水量中的雨水用量/区域内市政总用水量(%)。

3 基于层次分析法的变权 PROMETHEE 评价模型

3.1 PROMETHEE 法

PROMETHEE 法是一种基于方案的两两比较的

多属性决策分析方法,它是建立在“级别优先于”关系上的排序方法^[7]。该方法引入优先函数的概念,克服了 ELECTRE 法属性值之间差距大小的信息缺陷。

(1) 优先函数值的计算。对于某个目标或属性, PROMETHEE 会给每个方案定义一个优先函数,函数值从0到1。如果用 $P(x_i, x_j)$ 表示该优先函数,若函数值为0,表示 x_i 和 x_j 无差异;函数值越接近1,则 x_i 越优于 x_j ;当函数值为1时,表示 x_i 严格优于 x_j 。为了计算方便,可令 $d_{ij} = x_i - x_j$,则可构造优先函数如下:

$$P(x_i, x_j) = \begin{cases} 0, & d_{ij} < 0 \\ d_{ij}/d_{\max}, & 0 \leq d_{ij} \leq d_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_{\max} 为该指标各方案的最大差距。

(2) 优先指数的计算。对于每对方案 x_i 和 x_j ,当方案的各指标的权重赋值为 w_j 时($j = 1, 2, \dots, m$),定义综合相对优先指数为:

$$\Pi(x_i, x_j) = \frac{\sum_{k=1}^m w_k P_k(x_i, x_j)}{\sum_{k=1}^m w_k} \quad (2)$$

式中: m 为指标的总个数。

(3) 计算流入和流出。对于每个方案都定义流入和流出,分别用 Φ^+ 和 Φ^- 表示。对于方案 x_i ,流入为 $\Phi^+(x_i) = \sum_{x \in X} \Pi(x_i, x)$,流出为 $\Phi^-(x_i) = \sum_{x \in X} \Pi(x, x_i)$ 。

易知 $\Phi^+(x_i)$ 越大, x_i 相比其他方案的优先级别越高, $\Phi^-(x_i)$ 越小,其他方案比 x_i 优先级别高的可能性就越小。

(4) 计算净流。为了得到 X 上的完全序,可以给每个方案定义一个净流 $\Phi(x_i)$,计算公式如下:

$$\Phi(x_i) = \Phi^+(x_i) - \Phi^-(x_i) \quad (3)$$

通过计算可以得到每个方案的净流,通过各方案净流大小的排序可以得到各方案的优劣排序。

3.2 初始权重的确定

本文采用层次分析法确定权重,目标层为雨水利用效率,指标子层为6个评价指标。

3.3 变权模型

层次分析法确定的权重主观性较大,未能与实测数据相结合,某些指标较差,但相应的权重很小,这样综合评价就很可能将这些指标中和掉,使评价缺乏公平性。为此,可以将这些较差的指标的权重适当上调,以示惩罚,保证评价的公平性。

构造惩罚型变权函数如下:

$$w'_j = \frac{w_j/x_j}{\sum_{j=1}^m w_j/x_j} \quad (4)$$

式中： w_j 为层次分析法确定的初始权重； x_j 为该地区指标 j 相比其他地区的优先度。

这样根据不同方案的各自指标进行变权分析显得更加合理。将变权后的权重运用到 PROMETHEE 模型中。

4 实例运用

以云南省的 4 个区域为例,利用基于层次分析法的变权 PROMETHEE 模型对它们的雨水利用现状进行评价。各地区的雨水利用现状见表 1。

4.1 各评价指标初始权重的确定

首先利用层次分析法确定初始权重,各指标的相对重要性见表 2。

表 1 4 个区域的雨水利用现状指标表

指 标	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
多年平均降雨量/mm	700	800	1000	1200
年人工积蓄雨水总量/mm	47	43	51	46
生态环境用水量/ 10^8 m^3	0.66	0.64	0.75	0.72
生态环境用水量中的雨水利用量/ 10^4 m^3	345	160	410	350
工业用水量/ 10^8 m^3	5.1	4.8	6.5	5.8
工业用水量中的雨水利用量/ 10^8 m^3	0.43	0.35	0.31	0.51
耕地总面积/ km^2	320	170	330	260
利用雨水灌溉的耕地面积/ km^2	29	28	35	19
生活用水量/ 10^8 m^3	9.6	8.4	7.9	8.7
生活用水量中的雨水利用量/ 10^8 m^3	0.6	1.5	1.9	0.9
市政用水量/ 10^8 m^3	3.5	4.1	3.7	5.3
市政用水量中的雨水利用量/ 10^8 m^3	1.1	1.2	1.5	0.6

表 2 各指标的相对重要性表

指 标	雨水资源 控制率	灌溉用水 雨水利用率	生活用水 雨水利用率	工业用水 雨水利用率	生态用水 雨水利用率	市政用水 雨水利用率
雨水资源控制率	1	1/3	3	2	2	3
灌溉用水雨水利用率	3	1	6	4	4	6
生活用水雨水利用率	1/3	1/6	1	1/2	1/2	1
工业用水雨水利用率	1/2	1/4	2	1	1	2
生态用水雨水利用率	1/2	1/4	2	1	1	2
市政用水雨水利用率	1/3	1/6	1	1/2	1/2	1

根据表 2 可得判断矩阵 A ,下面近似地求解 λ_{\max} 和权向量。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 6 & 4 & 4 & 6 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/4 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{按列归一化}} A' = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.15 & 0.20 & 0.22 & 0.22 & 0.20 \\ 0.53 & 0.46 & 0.40 & 0.44 & 0.44 & 0.40 \\ 0.06 & 0.08 & 0.07 & 0.06 & 0.06 & 0.07 \\ 0.09 & 0.12 & 0.13 & 0.11 & 0.11 & 0.13 \\ 0.09 & 0.12 & 0.13 & 0.11 & 0.11 & 0.13 \\ 0.06 & 0.08 & 0.07 & 0.06 & 0.06 & 0.07 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{行向量相加}}$$

$$A'' = \begin{bmatrix} 1.17 \\ 2.68 \\ 0.38 \\ 0.69 \\ 0.69 \\ 0.38 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{归一化}} W = \begin{bmatrix} 0.19 \\ 0.45 \\ 0.06 \\ 0.12 \\ 0.12 \\ 0.06 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{(AW)_i}{nW_i} = \frac{1}{6} \times \left(\frac{1.18}{0.19} + \frac{2.70}{0.45} + \frac{0.38}{0.06} + \frac{0.69}{0.12} + \frac{0.69}{0.12} + \frac{0.38}{0.06} \right) = 6.063$$

$$CI = \frac{6.063 - 6}{6 - 1} = 0.0126$$

计算得到 CI 为 0.0126, RI 查表为 1.26, 则 $CR = 0.0126/1.26 = 0.01 < 0.1$, 所以可认为判断矩阵 A 满足一致性的要求, 所以层次分析法确定的初始权重为(0.19, 0.45, 0.06, 0.12, 0.12, 0.06)。

根据各项指标的计算公式求出各区域各项指标大小, 具体见下表 3。

表 3 4 个区域各项指标值 %

指标编号	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
指标 1	6.71	5.38	5.10	3.83
指标 2	9.06	16.47	10.61	7.31
指标 3	6.25	17.86	24.05	10.34
指标 4	8.43	7.29	4.77	8.79
指标 5	5.23	2.50	5.47	4.86
指标 6	31.43	29.27	40.54	11.32

4.2 变权后各评价指标权重的确定

变权分析将层次分析法确定的初始权重与各地区评价指标的值结合分析。由于各个指标之间计量单位、数量级或性质不尽相同, 往往使各指标缺乏可比性。

当各指标间的水平相差很大时, 如果直接用原始指标值进行分析, 就会突出数值较高的指标在综合分析中的作用, 相对削弱数值水平较低指标的作用^[10]。因此首先需要对各区域的指标值进行无量纲化的处理, 本文确定的 6 个指标皆为“效益型”指标, 即越大越好, 所以可采用极值化公式(5)进行无量纲化的处理。

$$B'_{ij} = \frac{B_{ij}}{\max_j B_{ij}} \quad (5)$$

式中: B_{ij} 为区域 i 指标 j 的初始值; B'_{ij} 为区域 i 指标 j 无量纲化后的值; $\max_j B_{ij}$ 为 4 个区域指标 j 的最大值。

无量纲化处理后的各区域的各指标值参见表 4。

表 4 无量纲化处理后的 4 个地区的各项指标值

指标编号	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
指标 1	1.00	0.80	0.76	0.57
指标 2	0.55	1.00	0.64	0.44
指标 3	0.26	0.74	1.00	0.43
指标 4	0.96	0.83	0.54	1.00
指标 5	0.96	0.46	1.00	0.89
指标 6	0.78	0.72	1.00	0.28

根据惩罚型变权函数公式对层次分析法确定的初始权重进行变权分析, 得到变权后的权重见表 5。

从表 4 可以看出, 区域 1 的指标 3 的值仅为

0.26, 远小于其他 3 个区域, 层次分析法确定的指标 3 的权重只有 0.06, 变权后的指标 3 权重则增加到 0.15, 相应的, 区域 1 较好的指标 1、指标 4 和指标 5 的权重都有所减小, 这样区域 1 较差的指标 3 就不容易被其他较好的指标中和掉, 保证了综合评价的公平性, 同时也体现了本文采用变权分析的必要性。同理可见区域 4 的指标 6。

表 5 变权后的 4 个地区的各项指标的权重

指标编号	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
指标 1	0.12	0.19	0.18	0.17
指标 2	0.52	0.36	0.49	0.51
指标 3	0.15	0.07	0.05	0.07
指标 4	0.08	0.11	0.15	0.06
指标 5	0.08	0.20	0.08	0.07
指标 6	0.05	0.07	0.05	0.12

4.3 PROMETHEE 法运用分析

首先根据优先函数公式计算不同指标下的各地区的相对优先度, 具体见表 6~11。

计算各区域的相对优先指数、入流和出流, 计算结果见表 12。

表 6 4 个地区指标 1 的相对优先度

指标 1	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
区域 1		0.46	0.56	1.00
区域 2	0		0.10	0.54
区域 3	0	0		0.44
区域 4	0	0	0	

表 7 4 个地区指标 2 的相对优先度

指标 2	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
区域 1		0	0	0.19
区域 2	0.81		0.64	1.00
区域 3	0.17	0		0.36
区域 4	0	0	0	

表 8 4 个地区指标 3 的相对优先度

指标 3	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
区域 1		0	0	0
区域 2	0.65		0	0.42
区域 3	1.00	0.35		0.77
区域 4	0.23	0	0	

表9 4个地区指标4的相对优先度

指标4	区域1	区域2	区域3	区域4
区域1		0.28	0.91	0
区域2	0		0.63	0
区域3	0	0		0
区域4	0.09	0.37	1.00	

表10 4个地区指标5的相对优先度

指标5	区域1	区域2	区域3	区域4
区域1		0.92	0	0.12
区域2	0		0	0
区域3	0.08	1.00		0.20
区域4	0	0.80	0	

表11 4个地区指标6的相对优先度

指标6	区域1	区域2	区域3	区域4
区域1		0.07	0	0.69
区域2	0		0	0.61
区域3	0.31	0.39		1.00
区域4	0	0	0	

表12 4个区域的相对优先指数、入流和出流

	区域1	区域2	区域3	区域4	入流
区域1	0.00	0.15	0.14	0.27	0.56
区域2	0.33	0.00	0.32	0.53	1.18
区域3	0.15	0.12	0.00	0.35	0.62
区域4	0.02	0.07	0.06	0.00	0.16
出流	0.50	0.34	0.51	1.15	

最后按各区域的入流减去出流得出各区域的净流,结果见表13。

表13 4个区域的净流及排名

区域编号	净流	排名
区域1	0.06	3
区域2	0.84	1
区域3	0.10	2
区域4	-1.00	4

根据各区域的净流大小可得4个区域的雨水利用现状的优劣排序,最优的是区域2,且远远优于其他3个区域,区域3和区域1次之,区域4最差,且远远劣于其他3个区域,说明区域4的雨水利用亟待改善。

4.4 可行性的验证

为了验证本文提出的评价模型的可行性,笔者另外采用参考文献[7]提出的综合指数评价法和参考文献[6]提出的模糊综合评价法对本文研究的4个区域进行综合评价,具体结果参见表14和表15。

表14 综合指数评价法结果表

区域编号	综合指数	排名
区域1	0.71	3
区域2	0.84	1
区域3	0.74	2
区域4	0.57	4

表15 模糊评价法结果表

区域编号	综合指数	排名
区域1	0.34	2
区域2	0.33	3
区域3	0.36	1
区域4	0.31	4

从表14和15可以看出,本文提出的模型的结果与综合指数法的结果相同。综合指数法适用于评价目的、标准有明确规定,评价对象差异不太悬殊,各单项指标值波动不太大的情况^[11],本文的研究对象比较符合上述要求。而模糊评价法的结果显示,区域3的雨水利用现状最优,区域1和区域2次之,区域4最差,该结果与本文提出的模型的结果以及综合指数法的结果出入较大,而且各地区的评分差距很小,区分度不高。分析模糊评价法的计算过程,在计算隶属度时,并没有对各地区的初始指标值进行预处理,上文也指出,这样会导致突出指标值较大的指标的作用,削弱指标值较小的指标的作用,本文提出的评价模型对初始数据进行了无量纲化处理,保证了评价的合理性。此外,模糊评价法直接采用了层次分析法确定的权重,主观性较大,本文提出的评价模型对层次分析法确定的权重进行变权分析,保证了评价的公平性。

综合3种评价方法,参考文献[7]中的综合指数法简单易懂,但处理过程过于直接,模型会存在误差,并且直接采用了层次分析法确定的权重,不能保证评价的公平性;参考文献[6]中的模糊评价法未对初始指标值进行无量纲化处理,直接采用了层次分析法确定的权重,并且各评价等级以及相应评分的确定的主观性较大,所以评价结果较难满足客观

性的要求,而且区分度较差。本文对上述的不足之处进行改进,兼顾了主观性和客观性,区分度较高且结果比较合理。

4.5 针对性改进建议

为了便于给不同区域提出针对性的改进建议,可将各地区的各指标除以相对应的指标权重,得出同一区域下不同指标的评分,具体结果见表 16。

表 16 同一区域下的不同指标的评分

指标编号	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
指标 1	1.80	0.90	0.84	0.91
指标 2	0.23	0.60	0.26	0.24
指标 3	0.38	2.41	4.54	1.61
指标 4	2.89	1.69	0.75	4.89
指标 5	2.87	0.51	2.55	3.87
指标 6	3.36	2.28	4.54	0.68

从表 16 可以看出区域 1 的指标 2 和指标 3 评分较低,即农业灌溉用水中雨水所占比例和生活用水中雨水所占比例较低,因此对于区域 1 来说,这两个指标是需要着重改善的。具体可以修建和完善农业和生活雨水利用工程,改进雨水利用技术。其他地区类似,在此不再赘述。

5 结 论

(1) 本文提出的基于层次分析法的变权 PROMETHEE 模型思路清晰,简单易行,容易被决策者理解和接受,可用于多指标多方案的综合评价,采用该方法对云南省 4 个区域的雨水利用现状进行评价,结果显示,区域 2 的雨水利用情况最优,区域 4 的雨水利用情况最差,同时给出了同一区域的不同指标的评分,以便于不同区域针对性地改进工作。

(2) 与现有的评价方法不同,本文采用层次分析法确定初始权重,然后运用变权分析的方法,兼顾了评价的主观性和客观性,同时保证了评价模型的合理性和公平性。

(3) PROMETHEE 评价法的优先度的计算与模糊评价法的隶属度的计算相比客观真实,不受评价等级的约束。

综合来看,本文提出的评价模型具有较大的实用性。

参考文献:

- [1] 赵西宁,冯浩,吴普特,等. 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报,2005,20(3):354-360.
- [2] 宋士强,王明刚,李春莲,等. 基于物元分析法的雨水资源开发评价[J]. 中国水运(下半月),2009,9(1):179-181.
- [3] 徐建新,郭文献,卢双宝. 集对分析法在区域雨水资源开发利用潜力综合评价中的应用[J]. 灌溉排水学报,2005,24(4):66-68+72.
- [4] 郭文献,徐建新,卢双宝. 区域雨水资源开发利用潜力的灰色关联分析与评价[J]. 灌溉排水学报,2005,24(3):50-52.
- [5] 陈卫宾,徐建新,张亮. 区域雨水资源开发利用潜力综合评价[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):66-68.
- [6] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2003:157-162.
- [7] 胡君,蒋艳. PROMETHEE 方法在城市环境空气质量评价中的应用[J]. 上海理工大学学报,2012,34(4):318-322.
- [8] 周彬,钟林生,陈田,等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1854-1862.
- [9] 车雨洪. 变权公式中参数 α 的性态分析[J]. 价值工程,2012,31(14):245-246.
- [10] 李博. 多指标综合评价方法应用中存在的问题与对策[J]. 沈阳工程学院学报(社会科学版),2010,6(2):200-202+236.
- [11] 贾品,李晓斌,王金秀. 几种典型综合评价方法的比较[J]. 中国医院统计,2008,15(4):351-353.
- [12] 孔刚,陈建刚,王全九,等. 雨水利用环境效益评价指标体系研究[J]. 人民黄河,2009,31(12):67-68.
- [13] 孙世岩,朱惠民. PROMETHEE 优先函数选择与参数配置方法[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(1):120-124.
- [14] 朱文彬,吕爱锋,曲波. 我国城市雨水资源化利用的效益评价[J]. 给水排水,2017,53(s1):123-127.
- [15] 张冠军. 城市雨水开发与利用新思路[J]. 河北建筑工程学院学报,2015,33(3):73-76.
- [16] 付勇智. 浅析水资源利用效率的评价方法[J]. 科技创新与应用,2016(34):241.