



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.003

胡铁松, 张兵堂, 程晓峰, 等. 基于非负矩阵分解的水量分配方案后评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 13-19, 66. HU Tie song, ZHANG Bing tang, CHENG Xiaofeng, et al. Post evaluation of water allocation based on non-negative matrix factorization[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 13-19, 66. (in Chinese)

## 基于非负矩阵分解的水量分配方案后评价

胡铁松, 张兵堂, 程晓峰, 熊 威

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 提出了水量分配方案后评价指标体系, 建立了基于非负矩阵分解的水量分配方案后评价模型, 并以1983年国务院批复的引滦水量分配方案为研究对象进行了水量分配方案诊断式后评价。该方法利用非负矩阵分解算法将指标矩阵最大程度分解为基向量和权向量, 根据权向量元素的数值对水量分配方案进行评级, 根据基向量元素的数值判断评价指标的实施状况。通过对引滦水量分配方案质量、实施过程、实施效果和可持续性的调查分析, 得出方案综合后评价结果为优, 但在来水可持续性、对水环境影响及水质目标保证率等方面需加以改进。评价结果表明, 基于非负矩阵分解原理的后评价方法评价效果较好, 可为水量分配方案等项目的后评价提供科学依据。

**关键词:** 水量分配; 后评价; 指标体系; 非负矩阵分解; 引滦水量分配

**中图分类号:** TV 213    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0013-07

### Post-evaluation of water allocation based on non-negative matrix factorization

HU Tie song, ZHANG Bing tang, CHENG Xiaofeng, XIONG Wei

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper established an evaluation index system for water allocation and developed a new post-evaluation model based on non-negative matrix factorization (NMF) for diagnostic evaluation. The model used NMF to decompose the data matrix into base vectors and weight vectors to the greatest extent. Then the base vector was used to assess the evaluation indexes, and the weight vector was used for grading the evaluation scheme. This model was applied to evaluate the water allocation scheme for Luanhe River in terms of scheme quality, implementation process, implementation effect, and sustainability. The scheme was graded as excellent, but needs improvement regarding water sustainability, impact on the water environment, and guarantee rate of water quality targets. Results showed that the post-evaluation model based on NMF can produce satisfactory outcomes and can provide a scientific basis for post-evaluation of water allocation schemes.

**Key words:** water allocation; post-evaluation; index system; non-negative matrix factorization; Luanhe River water diversion

水量分配是指对水资源可利用总量或可分配水量向行政区域进行的逐级分配, 其方案制定与实施关系到区域经济、社会和环境的综合效益<sup>[1]</sup>。但由于水文情势和社会经济需求的不断变化, 水量分配方案的制定并非是一蹴而就的。如黄河、科罗拉多河

和墨累-达令河等流域的水量分配方案在制定与实施过程中都存在着诸多问题, 需要进行多次评价与完善<sup>[2-4]</sup>。开展水量分配方案后评价目的是总结方案制定实施过程中的经验和教训, 诊断存在的问题及原因, 促进水量分配方案的进一步落实、修正和完善。

收稿日期: 2016-12-01    修回日期: 2017-03-11    网络出版时间: 2017-05-06  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1645.018.html>  
基金项目: 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201612)

**Fund:** Key Scientific Research Project of Water Resources in Hubei Province (HBSLKY201612)

**作者简介:** 胡铁松(1964-), 男, 湖北浠水人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: tshu@whu.edu.cn

**通讯作者:** 张兵堂(1991-), 男, 河南灵宝人, 主要从事水资源规划管理方面研究。E-mail: bctang1991@163.com

后评价牵涉的指标数量多,评价信息庞杂,评价过程中常遇到三大难题:其一,评价过程常涉及高维数据的分析处理;其二,难以从数量较多的评价指标中准确分析出优势和劣势指标,从而进行诊断性后评价;其三,难以确定合适的指标权重。为此,许多学者对综合评价方法的理论和实践进行了研究,评价方法从最初的前后对比法、成功度法、逻辑框架法发展到层次分析法、理想点法、模糊综合评价法、灰色系统评价法和神经网络法等<sup>[5-10]</sup>,其中被广泛应用的是理想点法和层次分析法,但在应用中均受一定的限制。其中,理想点法在进行后评价时,需给定理想点和权重,且只能得出最终的综合评价结果,无法分析某项指标的优劣,因而只知评价结果,无法进行诊断性后评价;层次分析法需通过两两对比分析得出指标权重,在应对数目较大的后评价指标体系时计算复杂,缺乏效率。

非负矩阵分解是一种高效处理矩阵数据的方法,能够大幅消减原始矩阵的维数,从而提取出矩阵中的关键信息<sup>[11]</sup>。目前非负矩阵分解在很多领域都得到了广泛的应用, Lee 和 Seung 首次提出 NMF 理论时便将其用于人脸识别<sup>[12]</sup>,其后 M Arngren<sup>[13]</sup>、F Kaiser<sup>[14]</sup>、Y Li<sup>[15]</sup>等分别将其运用到图像处理、声音识别、数据挖掘等领域。水量分配方案后评价指标数量较多,评价矩阵信息庞杂,因此本文基于非负矩阵分解原理建立一种新的后评价模型,使评价过程更为简便,同时能够实现诊断式后评价。

### 1 基于 NMF 原理的后评价方法

非负矩阵分解原理(Non-negative matrix factorization, NMF)是由 Lee 和 Seung 1999 年在《Nature》上提出的一种新的矩阵分解算法,与其他特征抽取算法相比,该算法对分解结果非负的限制具有实现上的简便性、分解形式和分解结果上的可解释性等优点<sup>[16-17]</sup>。

NMF 算法用数学语言可描述为<sup>[18]</sup>: 对于一个  $n \times m$  阶的非负矩阵  $V$ , 可将其分解为一个  $n \times r$  阶的非负矩阵  $W$  和一个  $r \times m$  阶的非负矩阵  $H$  的乘积,即  $V = W \times H$ 。

假设水量分配方案后评价中有  $n$  个评价指标和  $m$  个评价等级,请  $k$  名专家对  $n$  项指标进行评分,统计各评价等级专家人数占比,由此可建立评价数据矩阵  $V$ :

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

根据非负矩阵的分解原理,当  $r = 1$  时矩阵  $V$  可近似分解为非负列向量  $W$  与非负行向量  $H$  的乘积。为最大限度地分解矩阵  $V$ , Lee 和 Seung<sup>[12]</sup> 提出了一种基于欧氏距离的目标函数:

$$\begin{cases} E(V \| WH) = \frac{1}{2} \| V - WH \|_F^2 = \\ \frac{1}{2} \sum_j (V_j - (WH)_j)^2 \\ s. t. W \geq 0, H \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

并证明了欧氏距离在下述迭代下是非增的:

$$\begin{cases} H_j \leftarrow H_j \frac{(W^T V)_j}{(W^T W H)_j} \\ W_i \leftarrow W_i \frac{(V H^T)_i}{(W H^T H)_i} \end{cases} \quad (3)$$

当且仅当  $W$  和  $H$  是稳定点时,欧氏距离最小且不再变化。该迭代公式具有收敛性和解的存在性。

分析式(3)可知,当欧氏距离  $E$  达到最小值时,  $W$  和  $H$  均不具备唯一性。当  $H$  中的所有元素同时放大  $k$  倍,  $W$  中所有元素会变成原来的  $1/k$ 。因此,为保证欧式距离最小时非负分解的唯一性,增加如下独立条件:

$$W_i \leftarrow \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

通过上述迭代公式,可以计算出欧式距离最小时矩阵  $V$  分解后的列向量  $W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$  与行向量  $H^* = (h_1^*, h_2^*, \dots, h_m^*)$ 。为衡量非负矩阵分解后数据信息的完整性,定义欧氏距离最小时矩阵  $V$  的分解偏度如下:

$$\delta^* = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (v_{ij} - w_i^* h_j^*)^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_{ij}} \quad (5)$$

矩阵分解偏度  $\delta^*$  表示欧氏距离最小时矩阵分解后的信息丢失程度。偏度  $\delta^*$  越小,矩阵分解后的信息丢失越少,分解结果越真实可信。当分解偏度  $\delta^*$  小于 0.1 时,认为分解结果是可以接受的。

在求得列向量  $W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$  与行向量  $H^* = (h_1^*, h_2^*, \dots, h_m^*)$  后,由于基向量集合所有专家对各项指标的评价等级信息,权向量综合了各位专家对所有指标评价等级信息,因此可以用基向量元素的大小衡量各项指标的优劣,用权向量元素的大小判断水量分配方案的综合评价等级。

## 2 水量分配方案后评价指标体系的构建与评价标准

### 2.1 水量分配方案后评价指标体系的构建

评价指标体系的建立是后评价工作的基础。目

前国内尚缺乏用于水量分配方案后评价的指标体系,因此需借鉴其他项目后评价指标体系的建立思路形成初选指标体系,并采用德尔菲法对其进行筛选,其建立流程图见图1。

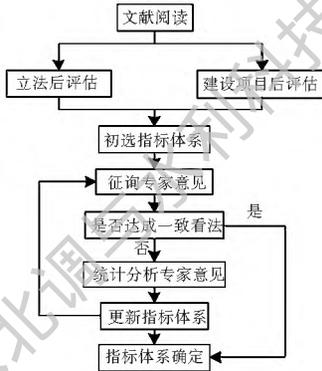


图1 指标体系建立流程

Fig.1 Flow chart of establishing the index system

图1中立法后评价是针对已通过并实施的法律进行评估,需评估法律实施过程、效果和立法质量<sup>[19-20]</sup>;而建设项目后评价的指标体系依据行业特性的不同而不同,国家计委要求重点建设项目的后评价内容需包含过程评价、经济效益评价、影响评价和持续性评价<sup>[21-23]</sup>。水量分配方案和立法均是通过条文发挥效用,因此需评估方案本身的质量、实施过程和效果;同时和立法不同是水量分配方案的既定目标是否能长期持续会受到气候变化、人类活动等因素的影响,因此需评价方案的可持续性<sup>[24]</sup>。

根据以上分析初步制定了水量分配方案后评估指标体系并采用德尔菲法筛选确定,最终形成了以方案质量、实施过程、实施效果及其可持续性为准则的水量分配方案后评估指标体系,该指标体系由1个目标、4个准则、10个内涵和24项指标构成(表1)。指标体系的设计是基于目标导向的构造原则,即要求水量分配能更好地保护生态、节约水资源和促进水资源可持续利用。

## 2.2 单向指标评价标准

指标体系建立后,为统一标准,在具体应用时需制定单项指标评价标准。标准依据指标的评估目标和相关的文件制定。限于篇幅对单项指标评价标准的制定不做一一赘述,仅选用一项定性指标和一项定量指标为例加以说明。其中定性指标选用“分配要素合理性”为例。按水利部颁布的《水量分配暂行办法》及《水量分配方案制定技术大纲》对分配要素的要求,以是否考虑水质、是否考虑地下水、是否考虑生态用水、分配对象是耗损水量还是用水量为考核因素,推荐水量分配要素合理性评价标准如下。

表1 水量分配方案后评价指标体系

Tab.1 Post evaluation index system for water allocation schemes

目标层	准则层	内涵层	指标层	
方案质量 a <sub>1</sub>	合理性 b <sub>1</sub>	水量分配要素合理性 c <sub>1</sub>		
		区域间用水公平性 c <sub>2</sub>		
		河道内生态环境用水满足程度 c <sub>3</sub>		
	可操作性 b <sub>3</sub>	衔接性 b <sub>2</sub>	与三条红线控制指标的衔接性 c <sub>4</sub>	
与涉水规划成果的衔接性 c <sub>5</sub>				
实施过程 a <sub>2</sub>	合法性 b <sub>4</sub>	编制部门的合法性 c <sub>8</sub>		
		批准机关的合法性 c <sub>9</sub>		
	调度过程 b <sub>6</sub>	分水指标确定过程 b <sub>5</sub>	来水量预测精度 c <sub>10</sub>	
			确定与下达的分水指标合理性 c <sub>11</sub>	
实施效果 a <sub>3</sub>	水量分配效果 b <sub>7</sub>	年分配水量偏差系数 c <sub>14</sub>		
		控制断面年最小下泄流量与生态流量保证率 c <sub>15</sub>		
		控制断面水质控制目标保证率 c <sub>16</sub>		
	作用与影响 b <sub>8</sub>	对区域经济社会发展作用与影响 c <sub>17</sub>		
对区域水环境作用与影响 c <sub>18</sub>				
对区域水生态作用与影响 c <sub>19</sub>				
对水资源管理作用与影响 c <sub>20</sub>				
可持续性 a <sub>4</sub>	来水可持续性 b <sub>9</sub>	来水可持续性 c <sub>21</sub>		
		用水可持续性 c <sub>22</sub>		
	制度可持续性 b <sub>10</sub>	管理体制可持续性 c <sub>23</sub>		
		政策制度可持续性 c <sub>24</sub>		

(1) 方案给出地表水耗损量及相应的用水量分配成果,进行水质水量双控制,并考虑河道内生态用水,则分配要素合理性为优。

(2) 方案给出地表水耗损量分配成果,并考虑河道内生态用水,则分配要素合理性为良。

(3) 方案给出地表水耗损量分配成果,则分配要素合理性为中。

(4) 方案仅给出地表水取用水量分配成果,则分配要素合理性为差。

定量指标选用“年分配水量偏离系数”为例。当申请用水小于分水指标时,偏离系数是指实际供水和申请用水的偏差值,以检验是否满足需求或造成资源浪费;当申请用水大于分水指标时,偏离系数是指实际供水和分水指标的偏差值,以衡量分配方案的约束效用。即分配水量偏差系数计算公式如下:

$$P_i = \begin{cases} \frac{|S_i - Y_i|}{Y_i} & Y_i \leq F_i \\ \frac{|S_i - F_i|}{F_i} & Y_i > F_i \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $i$  为年份;  $S_i$  为第  $i$  年实际供水;  $y_i$  为第  $i$  年申请用水;  $F_i$  为第  $i$  年分水指标;  $p_i$  为第  $i$  年偏差。

在具体评价时, 推荐以下评价标准: 若偏差系数小于 10%, 评价级别为优; 偏差系数为 10%~20%, 评价级别为良; 偏差系数为 21%~50%, 评价级别为中; 偏差系数大于 50%, 评价级别为差。

### 3 引滦水量分配方案后评价

#### 3.1 引滦工程水量分配方案

自 1983 年国务院批复引滦水量分配方案以来, 该方案已实施 30 余年, 为天津市和河北省创造了巨大的经济、社会和环境效益<sup>[25]</sup>。但与此同时该方案还存在诸多问题, 如在分配水量时未考虑下游生态

用水等, 同时受气候变化与人类活动影响, 相同保证率条件下潘家口和大黑汀水库的入库水量和可供水量已远低于 1983 年方案批复时<sup>[26]</sup>。因此, 有必要进行引滦水量分配方案诊断式后评价, 为水量分配方案的修订提供依据。

引滦水量分配对象是潘家口水库水量和潘家口至大黑汀水库的区间来水, 其中潘家口水库水量分配见表 2。

潘大区间水量分配依据 1983 年印发的《引滦水量分配与供水调度管理办法》: 当潘大区间年来水量等于或大于 2.2 亿  $m^3$  时, 大黑汀水库年供水量为 2.1 亿  $m^3$ ; 当区间年来水量小于 2.2 亿  $m^3$  时, 年供水量为区间年来水量减去库损 0.12 亿  $m^3$ 。

表 2 潘家口水库水量分配

Tab. 2 Water allocation in the Panjiakou reservoir

阶段	供水保证率 (%)	可分配水量 / 亿 $m^3$	天津		河北	
			分配水量 / 亿 $m^3$	分配比 (%)	分配水量 (亿 $m^3$ )	分配比 (%)
桃林口水库修建后	75	19.5	10	51.3	9.5	48.7
	85	15	8	53.3	7	46.7
	95	11	6.6	60	4.4	40
桃林口水库修建前	75	19.5	10	51.3	9.5	48.7
	85	15	7.5	50	7.5	50
	95	11	5.5	50	5.5	50

#### 3.2 方案后评价计算

评价标准制定后, 选用长期从事水量分配方案制定的 3 位专家和 4 位从事引滦水量分配工作的地方工作者组成专家组, 根据方案的实施情况和单项指标评价标准对引滦水量分配方案进行评价, 评价等级为优、良、中、差。统计结果中各等级的专家人数占比, 可得数据矩阵  $V$ 。对矩阵  $V$  采用维度为 1 的非负矩阵分解, 可确定各评价指标对应的基元素数值, 见表 3; 同时可得出各评价级别对应的权向量元素数值, 见表 4; 计算指标体系中准则层所对应评价指标的基元素均值, 见表 5。

#### 3.3 方案后评价结果分析

由于指标矩阵的分解偏度小于 0.1, 因此评价结果是可以接受的。

为分析求得的基向量和权向量的含义, 分别作基元素数值与单项指标专家打分均值相关关系图和权向量元素数值与评价等级专家人数占比之和的相关关系图见图 2、图 3。

由图 2 可知, 基元素数值与专家打分均值的相关系数为 0.978 3, 因此基向量中元素数值大小可以代表评价指标的优劣; 同时由图 3 可知, 权向量中元素数值与级别专家占比之和和相关系数为 0.980 6, 因

表 3 评价指标基向量元素值

Tab. 3 Base vector element values of evaluation indexes

指标	编号	基元素值
分配要素合理性	$c_1$	0.038 0
区域用水公平性	$c_2$	0.043 1
河道生态用水满足程度	$c_3$	0.046 5
与三条红线衔接性	$c_4$	0.036 4
与涉水规划衔接性	$c_5$	0.043 1
不同来水情景	$c_6$	0.046 4
落实到控制断面	$c_7$	0.053 2
编制部门合法性	$c_8$	0.054 9
批准机关合法性	$c_9$	0.054 9
来水量预测精度	$c_{10}$	0.044 8
分水指标合理性	$c_{11}$	0.044 8
调度方案合理性	$c_{12}$	0.054 9
监控体系的完整性	$c_{13}$	0.049 8
年分配水量偏离系数	$c_{14}$	0.048 1
最小下泄与生态流量保证率	$c_{15}$	0.041 4
水质控制目标保证率	$c_{16}$	0.017 9
对经济社会发展作用与影响	$c_{17}$	0.048 1
对环境作用与影响	$c_{18}$	0.017 0
对水生态作用与影响	$c_{19}$	0.022 9
对水资源管理作用与影响	$c_{20}$	0.054 9
来水可持续性	$c_{21}$	0.016 2
用水可持续性	$c_{22}$	0.016 2
管理体制可持续性	$c_{23}$	0.053 2
政策制度可持续性	$c_{24}$	0.053 2

此权向量元素大小可衡量水量分配方案的综合评价等级。由表 4 可知, 后评价级别中“优”对应的权向

表 4 评价指标权向量元素值

Tab. 4 Weight vector element values corresponding to grades

级别	优	良	中	差	$\delta^*$
权元素值	11.13	8.73	1.59	0.37	0.063

表 5 准则层基向量元素均值

Tab. 5 Mean value of base vector elements at criterion layer

准则层	质量	过程	效果	可持续性	元素均值
均值	0.046 3	0.048 6	0.035 8	0.034 7	0.041 7

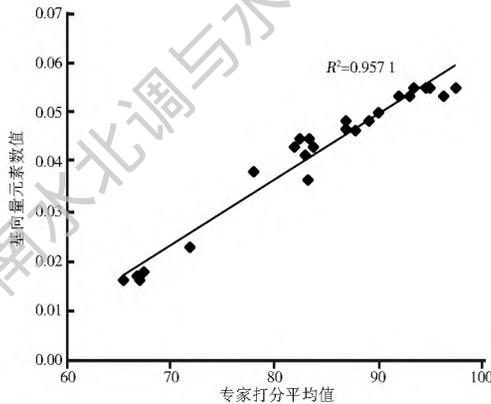


图 2 基向量与专家打分均值相关图  
Fig. 2 Correlativity between base vector and average score by expert

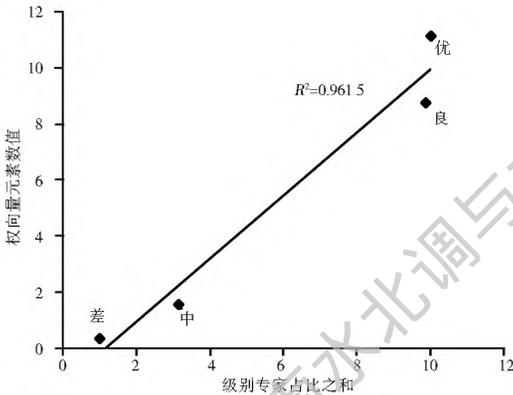


图 3 权向量与级别专家占比之和相关图  
Fig. 3 Correlativity between weight vector and proportion of experts at a certain grade

量元素值最大,因此引滦水量分配方案的评价等级为“优”。

基于上述计算结果,分析引滦水量分配各单项指标执行情况和四个准则的评价结果,可得出以下结论。

(1) 方案质量评价。

评价结果为良。

由表 5 可以看出,该准则层对应的指标层元素均值为 0.046 3,在 4 个准则中排名第二。分析表 3 中对应数据可知,这首先得益于方案的编制和审批均合理合法,符合《水量分配暂行办法》的相关要求;其次,方案与滦河流域早期规划的衔接性良好,此后

《滦河流域综合规划报告》和《海河流域水资源综合规划》等的制定也是基于 1983 年的引滦水量分配方案;最后,确定的区域间分水比例符合天津市和河北省的实际情况,用水公平性良好。

不足之处有两点,一是方案未考虑河道内生态用水,因此分配要素合理性评分略低;二是与三条红线控制指标衔接性较差,这是由于方案编制之初三条红线控制指标还未设立,因此需对水量分配方案进行相关修正。

(2) 方案实施过程评价。

评价结果为优。

由表 5 可以看出,其对应的指标层元素均值为 0.048 6,是 4 项准则层中最高的。分析表 3 中对应数据可知,这首先得益于引滦局制定了详细的供水计划和调水方案,保障了方案实施。其次,来水量预测精度较高,这与实际调查分析的结果是一致的,以调度年 2012 年-2013 年为例,潘家口水库来水量预测误差为 5.8%,潘大区间来水量预测误差为 10.4%,均满足《水文预报规范》对预测精度的要求。同时,确定与下达的分水指标较为合理。2003 年-2015 年分水指标与方案的平均偏离系数仅为 6.23%。最后,水量分配监控体系完整,控制断面设置合理且完善。

(3) 方案总体实施效果评价。

评价结果为中。

由表 5 可以看出,其对应的指标层均值为 0.035 8,低于方案质量和实施过程的评价结果。实施效果中较好的方面包括:一是规范了区域的水资源管理制度,明确了滦河流域的水权归属,对区域的水资源管理有良好的示范作用。二是促进了区域的经济社会良好发展,如引滦供水缓解了天津、唐山两地区的用水紧张局面,取得了较大的经济效益和社会效益。第三,天津市多年平均分配水量偏差系数为 12.07%,河北省为 21.60%,可以评级为良好,这与计算结果是一致的。

引滦水量分配实施的不利效果是其对滦河下游生态及环境的不利影响。引滦工程中的潘家口、大黑汀水库建成蓄水后,一直采用滴水不漏的运行方式,导致下游河道干涸,地下水位大幅下降,对沿河各县的经济社会和生态环境有较严重的负面影响。

(4) 方案可持续性评价。

评价结果为差。

由表 5 可以看出,其对应的指标层均值为 0.034 7,是四个准则层元素中最低的。这主要是因为随着水文情势和用水需求的不断变化,入库水量

减少、用水量增加,可分配水量不具有可持续性。这与实际计算分析的结果是一致的,潘家口水库2000年前后来水量情况如图4所示,2000年-2013年系列均值比1980年-1999年系列减少了55.5%。

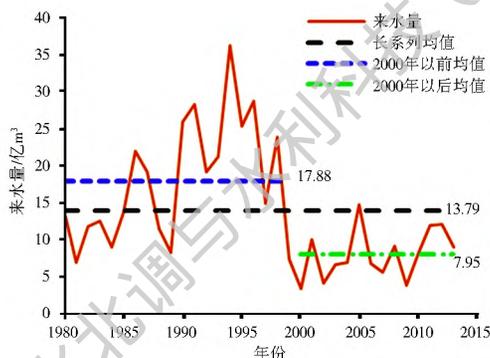


图4 2000年前后潘家口水库来水量对比

Fig. 4 The Panjiakou reservoir inflow before and after 2000

1980年-2013年天津、河北两地区的历年引滦水量见图5。由图5可知天津市引滦水量呈先增大后减小的趋势,但变化幅度不大;河北省年引滦水量呈显著下降趋势。总体上引滦工程的年供水量呈下降趋势。因此引滦工程用水不具有可持续性。

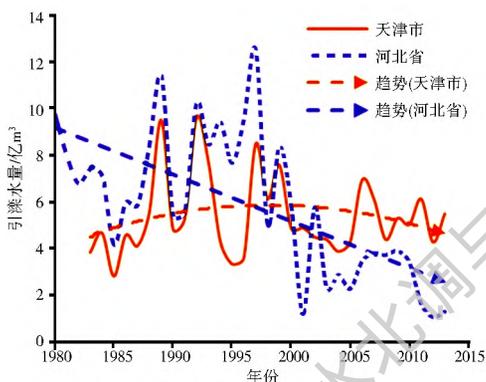


图5 1980年-2013年天津、河北引滦供水

Fig. 5 The water supply of Luanhe River to Tianjin and Hebei Province from 1980 to 2013

相比之下,引滦水量分配政策制度的可持续性则较好。引滦水量分配分工明确,实施机构完善,组织管理体系清晰,且有应对特殊情况的协商制度。同时,管理制度可持续性也较好,其实施过程中的管理制度包括计划用水制度、审批制度、监督考核制度、应急响应制度和合同管理制度等。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1) 本文提出了基于非负矩阵分解的水量分配方案后评价方法,该方法采用非负矩阵法对评价矩阵进行一维非负分解,并根据得到的权向量元素大小确定后评价等级,依据基向量元素大小衡量各评

价指标的优劣,避免了常见方法中需给定理想点和权重等的缺陷,计算过程简单,意义明确。

(2) 从方案质量、实施过程、实施效果和可持续性四个方面对引滦水量分配方案进行了系统分析,得出引滦水量分配方案综合评价结果为“优”的结论,这主要得益于方案具有合理性和可操作性,实施过程严谨且促进了区域水资源管理。同时指出了引滦水量分配方案及其实施过程中存在的不足,如用水和来水可持续性差,水质目标达标率差和对区域的水环境有不利影响等。

### 4.2 展望

根据本文研究,建议今后在引滦水量分配方案修订及其实施过程中注意以下问题:首先应根据近些年的来水情况和用水情况重新计算可分配水量和分水比例;其次是加强对水环境和水生态的保护,在实施过程中需考虑水质要求;三是要修正方案使其符合三条红线的要求。

同时,本文的研究尽管有其理论和实践意义,但不可避免地存在一些不足之处。首先,本文提出的指标体系主要是基于前人的研究成果,缺乏指标必要性和有效性的论证;其次,在制定单项指标评价标准时较为主观,不够严谨;最后,在应用非负矩阵分解法进行后评价时,缺乏对该方法优劣性的评价。在未来的研究中,还需要进一步完善。

### 参考文献(References):

- [1] 吕兰军.《水量分配暂行办法》给水文带来的机遇与挑战[J].水利发展研究,2008(8):44-45. (LV Lan jun. Opportunities and challenges for hydrology by Interim Measures For Water Distribution [J]. Water Resources Development Research, 2008 (8): 44-45. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1408. 2008. 08. 005
- [2] 杨彦明. 科罗拉多河水权分配的启示[J]. 水利发展研究, 2004, 4(9): 46-49. (YANG Yan ming. Enlightenment of water right allocation in Colorado River [J]. Water Resources Development Research, 2004, 4(9): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1408. 2004. 09. 014
- [3] 马建琴, 刘杰, 夏军, 等. 黄河流域与澳大利亚墨累-达令流域水管理对比分析[J]. 河南农业科学, 2009(7): 69-73. (MA Jian qin, LIU Jie, XIA Jun, et al. The comparative research on water management institution between the Yellow River Basin and Australian Murray Darling Basin [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2009(7): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-3268. 2009. 07. 019
- [4] 彭祥, 胡和平. 黄河可供水量分配方案的制度评价[J]. 人民黄河, 2006, 28(4): 41-43. (PENG Xiang, HU He ping. The institution evaluation on the distribution scheme of water supply in the Yellow River [J]. Yellow River, 2006, 28(4): 41-43. (in

- Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2006.04.019
- [5] 刘丽艳, 吴玉芹, 郭振苗. 浅谈节水灌溉项目后评价[J]. 中国水利, 2004(9): 39-41. (LIU Liryan, WU Yurqin, GUO Zhenmiao, Evaluation on water-saving irrigation[J]. China Water Resources, 2004(9): 39-41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2004.09.012
- [6] 叶珍. 基于AHP的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (YE Zhen. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [7] 段云龙, 周静斌, 申晓静. 基于熵权TOPSIS法的房地产项目后评价模型研究[J]. 项目管理技术, 2011(9): 40-44. (DUAN Yunlong, ZHOU Jingbin, SHEN Xiaojing. Evaluation of estate project based on entropy weight TOPSIS method[J]. Project Management Technology, 2011(9): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4313.2011.09.008
- [8] 徐健, 吴玮, 黄天寅, 等. 改进的模糊综合评价法在同里古镇水质评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 143-149. (XU Jian, WU Wei, HUANG Tianyin et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation to water quality evaluation in Tongli Town[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(2): 143-149. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.009
- [9] 华瑶, 周雨. 逻辑框架法在电网建设项目后评价中的应用[J]. 工业技术经济, 2011, 30(1): 97-102. (HUA Yao, ZHOU Yu. The application of logical framework approach in post evaluation of grid item[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2011, 30(1): 97-102. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2011.01.017
- [10] 李元松, 陈文峰, 李新平, 等. 基于模糊神经网络的边坡稳定性评价方法[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(1): 113-118. (LI Yuan song, CHEN Wen feng, LI Xin ping et al. Stability assessment of rock slope based on fuzzy neural network[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(1): 113-118. (in Chinese)) DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2013.01.022
- [11] 徐泰燕, 郝玉龙. 非负矩阵分解及其应用现状分析[J]. 武汉工业学院学报, 2010, 29(1): 109-114. (XU Taiyan, HAO Yulong. The current research situation analysis of nonnegative matrix factorization and applications[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2010, 29(1): 109-114. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-4881.2010.01.030
- [12] Daniel D. Lee, H. Sebastian Seung. Learning the parts of objects by nonnegative matrix factorization[J]. Nature, 1999, 401(6755): 788-791. DOI: 10.1038/44565
- [13] M Arngren, MN Schmidt, J Larsen. Unmixing of hyperspectral images using Bayesian nonnegative matrix factorization with volume prior[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2011, 65(3): 479-496. DOI: 10.1007/s11265-010-0533-2
- [14] F. Kaiser, T. Sikora. Music structure discovery in popular music using nonnegative matrix factorization[C]. Proceedings of International Society for Music Information Retrieval, 2010: 429-434.
- [15] Y Li, A Ngom. The nonnegative matrix factorization toolbox for biological data mining[J]. Source Code for Biology and Medicine, 2013, 8(1): 10-24. DOI: 10.1186/1751-0473-8-10
- [16] 黄帅栋, 卫志农, 高宗和等. 基于非负矩阵分解的相关向量机短期负荷预测模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 62-66. (HUANG Shuai dong, WEI Zhi nong, GAO Zong he et al. A short-term load forecasting model based on relevance vector machine with nonnegative matrix factorization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 62-66. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.11.011
- [17] 林滨, 张彦斌, 陈善工. 基于非负矩阵分解算法的工程陶瓷磨削表面损伤检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2459-2464. (LIN Bin, ZHANG Yan bin, CHEN Shan gong. Damage detection of engineering ceramics ground surface based on NMF[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2459-2464. (in Chinese)) DOI: 10.3788/OPE.20122011.2459
- [18] 王文俊, 张军英. 一种非负矩阵分解的快速方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 1-2. (WANG Wen jun, ZHANG Jun ying. Fast algorithm for nonnegative matrix factorization[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(25): 1-2. (in Chinese)) DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.25.001
- [19] 孙树曼. 我国立法后评估指标体系的构建[D]. 济南: 山东大学, 2009. (SU N Shu man. The construction of the post-assessment index system of China[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [20] 王保民, 崔东晓. 欧盟立法评估制度研究[J]. 行政与法, 2011, 0(5): 101-105. (WANG Bao min, CUI Dong xiao. A research on the legislative evaluation institution of European Community[J]. Public Administration & Law, 2011, 0(5): 101-105. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-8207.2011.05.025
- [21] 安中仁, 张文洁. 水利建设项目后评价[J]. 水利建设与管理, 2010, 30(9): 81-84. (AN Zhong ren, ZHANG Wen jie. Post evaluation of water conservancy construction project[J]. Water Resources Development & Management, 2010, 30(9): 81-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-4774.2010.09.035
- [22] 薛敏, 陆惠民. 完善我国政府投资项目后评价体系研究[J]. 工程管理学报, 2011, 25(3): 318-322. (XUE Min, LU Hui min. Research on improving the post evaluation system of government investment projects in China[J]. Journal of Engineering Management, 2011, 25(3): 318-322. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8859.2011.03.016
- [23] 蔡文婷. 政府投资项目后评价指标体系及评价方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑学院, 2011. (CAI Wen ting. The research of the government investment project post evaluation index system and methods[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011. (in Chinese))
- [24] 许新宜. 关于水量分配原则的几点看法[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 15-17. (XU Xin yi. Several Perspectives on the Principles for River Basin Water Allocation in China[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 15-17. (in Chinese)) DOI: 10.3742/SP.J.1201.2011.02015

(下转第66页)

- [12] 刘丹丹, 吴现兵, 程伍群等. 白洋淀流域降水特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 113-117. (LIU Dandan, WU Xiabing, CHENG Wujun, et al. Analysis of Characteristics of precipitation in Baiyangdian basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 113-117. (in Chinese))
- [13] 张仙娥, 刘妞, 仇亚琴等. 沂沭泗流域年降水和年地表水资源量演变趋势[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 24-28. (ZHANG Xiame, LIU Niu, QIU Yaqin, et al. Variation trend analysis of annual precipitation and surface water resources in the Yi-Shu-Si Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 24-28. (in Chinese))
- [14] 黄胜. 长江上游干流区径流变化规律及预测研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (HUANG Sheng. The research of runoff change and prediction in the upper Yangtze River area[D]. Chengdu: Sichuan university, 2006. (in Chinese))
- [15] Yuan J, Luan Q H, Ma Z Z, et al. Periodicity and trend analysis of hydrologic series in multi time scale in Liru Kuang zone of Handan, China[C]. 3rd International Symposium on Electronic Commerce and Security (ISECS). USA: IEEE Computer Society, 2010, 372-376.
- [16] 张仲荣. 太阳黑子和 SOI 对黄河上游径流的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (ZHANG Zhongrong. Impact of the sunspot and SOI on the Upper Yellow River Runoff[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2008. (in Chinese))
- [17] 潘杰. 常州地区 1978 年 2012 年降水量时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 14(2): 245-248. (PAN Jie, Spatial and temporal characteristics of precipitation in Changzhou Area from 1978 to 2012[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 14(2): 245-248. (in Chinese))
- [18] 刘妞, 张仙娥, 仇亚琴, 等. 莆田市降水量时空演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 842-846, 852. (LIU Niu, ZHANG Xiame, QIU Yaqin, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Putian City[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 842-846, 852. (in Chinese))
- [19] 项洋旭, 娄华君, 张征, 等. 马海盆地近 40 年以来气温、降水演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1-5. (XIANG Yangxu, LOU Huajun, ZHANG Zheng, et al. Variations of annual average temperature and precipitation in the Mahai Basin in recent 40 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1-5. (in Chinese))
- [20] 纪忠萍, 谷德军, 谢炯光. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 81-93. (JI Zhongping, GU Dejun, XIE Jiongguang. Multiple time scales analysis of climate variation in Guangzhou during the last 100 years[J]. Journal of Tropical meteorology, 1999, 15(1): 81-93. (in Chinese))
- [21] 熊秋芬, 张利平. “98·7” 武汉、黄石特大暴雨过程的小波分析[J]. 武汉水利电力大学学报: 自然科学版, 2000, 33(1): 53-58. (XIONG Qiufen, ZHANG Liping. Wavelet analysis of extreme rain in Wuhan and Huangshi stations in July 1998[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering: Natural science edition, 2000, 33(1): 53-58. (in Chinese))
- [22] Luan Q H, Yuan J, Guo Z H, et al. Analyzing the periodicity and trend of precipitation with multi resolution analysis in mountain regions of Handan, China[C]. 2nd Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS). USA: IEEE Computer Society, 2010, (3): 85-88.
- [23] 王晓琳. 基于小波分析的邯郸山区水文特性分析与预测[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012. (WANG Xiaolin. The analysis and prediction of hydrological characteristics based on wavelet analysis in Handan mountain area[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [24] 雷廷, 张兆吉, 费宇红, 等. 海河平原 1956 年-2011 年降水特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 32-36, 41. (LEI Ting, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Analysis of precipitation characteristics in the Haihe River Plain from 1956 to 2011[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 32-36, 41. (in Chinese))

(上接第 19 页)

- [25] 王立林, 王鸿艳, 齐德海, 等. 引滦入津工程水资源现状分析及解决措施[J]. 海河水利, 2008(5): 9-11. (WANG Lili, WANG Hongyan, QI Dehai et al. Water resources present situation analysis and solutions of water diversion from Luan River to Tianjin[J]. Haihe Water Resources, 2008(5): 9-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2008.05.004
- [26] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672. (ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff change in the Luanhe River Catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 664-672. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.04.012