

基于博弈论组合赋权法的澜沧江-湄公河水量分配

孙周亮^{1,2,3}, 刘艳丽^{1,2}, 刘冀⁴, 关铁生^{1,2}, 刘翠善^{1,2},
王国庆^{1,2}, 金君良^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 武汉大学 水资源与水电工程科学
国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 4. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为了合理分配澜沧江-湄公河的水资源,以公平合理利用基本原则为基础,充分考虑公平性和现状性,并兼顾效率性与可持续性,选择了相应的指标建立层次结构,基于结合主观性和客观性因素的思想,分别采用层次分析法和熵权法计算水量分配权重,并采用基于博弈论的组合赋权法对上述权重进行组合,最终得到各国的水量分配权重。以实际用水量占比和水量分配权重对比,结果表明:越南用水量约为其所得分配量的2倍,而其他国家用水量均小于分配量,为了保障各国对水资源的公平合理利用权益,越南应向其他国家进行补偿。结论可为我国在澜沧江-湄公河的水资源开发利用和水利益谈判提供科学支撑。

关键词: 水量分配; 组合赋权法; 利益补偿; 澜沧江-湄公河

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0001-05

Water allocation of Lancang-Mekong River based on game theory combination weighting method

SUN Zhouliang^{1,2,3}, LIU Yanli^{1,2}, LIU Ji⁴, GUAN Tiesheng^{1,2}, LIU Cuishan^{1,2},
WANG Guoqing^{1,2}, JIN Junliang^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}, BAO Zhenxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: To allocate the water resources in Lancang-Mekong River Basin, on the basis of the fundamental principles of equitable and reasonable utilization, this study took equity and the status quo into full consideration, paid attention to both efficiency and sustainability, and chose the corresponding indicators to establish hierarchy. Combining subjective and objective factors, analytic hierarchy process and entropy method were integratedly addressed to calculate weights of water allocation. The above weights were weighted further by the combined method based on game theory. Finally, the weights of water allocation were obtained. By comparing the proportion of actual water consumption and the weight of water allocation, the results showed that the water consumption in Vietnam was about twice as its allocated amount, whereas the water consumption in other countries was less than the allocated amount. In order to ensure the rights of equitable and reasonable utilization of water resources for riparian countries, Vietnam should compensate other countries. The conclusion could provide decision support for water resources utilization and water benefit negotiation in the Lancang-Mekong River Basin for China.

Key words: water allocation; combination weighting method; benefit compensation; Lancang-Mekong River

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-09-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601602); 国家自然科学基金项目(91747103、51679145、51779146); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y518007)

作者简介: 孙周亮(1993-), 男, 湖北咸宁人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。

通讯作者: 刘艳丽(1981-), 女, 河南泌阳人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。

1 研究背景

水资源利用矛盾是国际河流中典型的争端焦点,建立合理的水资源分配方案是缓解争端的有效途径^[1-2]。由于国际河流所流经国家之间存在显著的自然地理、社会经济、技术水平等差异,从而跨境水资源的利用通常为多目标利用^[3],因而目前对跨境水资源的研究集中在多目标分配方面^[4-5],基于指标分析的权重计算方法可以综合多种利用需求^[6],是常用的水资源多目标分配方法^[7-8]。

澜沧江-湄公河(下称澜湄)是发源于我国并流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南的一条重要国际河流,水资源总量丰富,但时空分布不均^[9-10],加上流域各国社会发展水平不一,对水资源需求存在较大差异,导致流域各国对澜湄流域水资源利用存在分歧^[11-12]。当前澜湄流域内尚无公认的水量分配方案,这种看似“自由”利用流域水资源的现状实质不利于水资源的合理利用和地区经济发展^[13-14],基于指标分析的权重法分配方案仍然是重要参考依据,尤其体现在分配总量方面。当前已有少量关于澜湄流域水资源分配的研究成果,由于不同研究者考虑的侧重点和采用的方法不尽相同,导致分配结果存在较大差异^[15-16]。

总的来说,权重法分配方案是基于各流域国对流域水资源的需求和贡献综合分析的结果,遵循公平合理原则,因而可能为跨境流域水资源分配方案所采用。考虑到权重法通常易受到研究者的主观影响,如典型的就层次分析法中需要研究者自行决定不同指标之间的相对评价价值^[15],因此本文考虑采用更加综合性的基于博弈论的组合赋权法进行分析^[17],以获得更为客观合理的权重。

2 研究方法

2.1 基于博弈论的组合赋权法

基于博弈论的组合赋权法^[18]是运用博弈论的方法,在不同权重结果之间寻找一种均衡,最小化不同权重与最优权重之间的偏差,达到主、客观权重兼顾的协调结果,本文主要是基于层次分析法的主观赋权和熵权法的客观赋权,最终得到反映决策者主观意向与指标客观属性的组合权重。具体计算方法如下^[17]:

设 L 种(本文 $L = 2$) 指标权重结果为 $W_k = \{W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}\} (k = 1, 2, \dots, L)$, n 为指标个数, k 为权重结果数量。权重线性组合系数为 $\alpha =$

$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, 则组合权重 w 为:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T \quad (1)$$

当 α 为最优组合系数时, w 即为最优组合权重。

根据博弈论的思想,以 w 和 W_k 的离差最小为目标,对上述线性组合系数进行优化,目标函数为:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T - W_j \right\|_2 \quad (j = 1, 2, \dots, L) \quad (2)$$

最优化一阶导数条件为:

$$\sum_{k=1}^L \alpha_k^* W_j W_k^T = W_j W_j^T \quad (j = 1, 2, \dots, L) \quad (3)$$

对求得的 α_k^* 进行归一化即可得到线性组合系数 α , 进而得到组合权重 w 。

2.2 基础权重计算方法

所谓基础权重是指用于组合赋权法中的权重,亦即组合赋权法的组合对象。从本文的研究目的出发,欲得到较为综合的水量分配权重,既要考虑各国的主观需求,也要考虑各国的客观因素,因此本文采用层次分析法^[15]和熵权法^[17]分别表征澜湄流域各国对水资源需求的主观性和客观性,具体计算方法不再赘述。

权重组合计算的步骤为:首先根据各指标数据计算按层次分析法和熵权法得到两组基础权重,然后代入组合赋权法中,采用博弈论方法进行优化得到两组基础权重的组合系数,从而得到最终的组合权重。

3 结果与分析

3.1 指标层次结构建立

根据跨境水资源分配指标体系^[15,19],分别从现状性、公平性、效率性和可持续性因素出发建立指标体系,基于指标的独立性、可操作性和资料可得性原则^[20],在各项因素中分别选取了对应的指标,并计算得到同一指标在不同国家的归一化指标值。其中公平性因素选择了流域面积贡献率、径流贡献率、人口数量、人均需水量 4 项指标,分别代表各国对流域水资源的贡献和水资源基本需求;现状性因素选择了生活用水量、农业用水量、工业用水量 3 项指标,分别代表各国的现状消耗性用水量;效率性因素选择了单方水工业产值、有效灌溉面积 2 项指标,分别代表用水产出水平和现状利用水平;可持续性因素选择了人口自然增长率和森林覆盖面积 2 项指标,分别代表人类可持续性和生态可持续性需求。根据上述指标体系建立的层次结构见图 1。收集到各项

指标并计算得出各国的归一化指标值,见表 1。

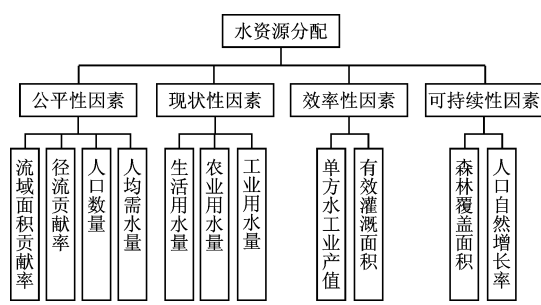


图 1 指标体系层次结构图

3.2 组合权重计算及水量分配

根据层次分析法对各级层次建立判断矩阵。首先对准则层的各项因素进行两两对比,得出各项因素之间的相对重要性。然后对各项因素中的指标进行两两对比,得出各项指标之间的相对重要性。结果如下:

$$G_0 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 5 \\ 1/3 & 1 & 5 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/3 & 1/7 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}, G_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $G_0 \sim G_4$ 分别为准则层和公平性因素、现状性因素、效率性因素、可持续性因素的判断矩阵。

经计算可知,各判断矩阵的一致性检验指标 CR 依次为 0.0433、0.0161、0.0061、0、0,均小于 0.1,即通过一致性检验。按层次分析法计算可得准则层权重、指标单权重及指标总权重。同时按熵权法可计算各指标的熵权法权重,计算结果见表 2。表 2 中 AHP 单权重是指同一准则层指标之间的相对权重,AHP 总权重是指所有指标的总权重(即 AHP 单权重与相应准则层权重的乘积),熵权法权重是指采用熵权法计算所得的各指标总权重。

表 1 澜湄流域各国归一化指标值

准则层	指标名称	中国	老挝	缅甸	泰国	柬埔寨	越南
公平性	流域面积贡献率	0.208	0.030	0.254	0.231	0.195	0.082
	径流贡献率	0.160	0.020	0.350	0.170	0.190	0.110
	人口数量	0.155	0.022	0.071	0.317	0.178	0.257
	人均需水量	0.197	0.115	0.064	0.070	0.446	0.108
现状性	生活用水量	0.144	0.004	0.084	0.394	0.183	0.191
	农业用水量	0.042	0.003	0.077	0.193	0.176	0.509
	工业用水量	0.414	0.006	0.038	0.269	0.038	0.235
效率性	单方水工业产值	0.136	0.054	0.120	0.530	0.031	0.129
	有效灌溉面积	0.051	0.003	0.039	0.334	0.119	0.454
可持续性	人口自然增长率	0.080	0.211	0.225	0.098	0.202	0.184
	森林覆盖率	0.112	0.118	0.118	0.225	0.202	0.225

将 AHP 总权重和熵权法权重分别对各国相应指标赋权,可分别得到各国总权重(即图 2 中层次分析法和熵权法对应的各国分配权重)。采用基于博弈论的组合赋权法对 AHP 和熵权法权重进行组合,经优化得出组合系数为 0.474、0.526,采用该组合系数对 AHP 和熵权法权重结果进行加权组合得到组合权重(即图 2 中组合赋权法对应的各国分配权重)。

从图 2 中的权重结果可知,层次分析法与熵权

法结果存在一定差异性,尤其以老挝和泰国的差异较大,主要原因是层次分析法中径流贡献率指标权重较大,老挝的径流贡献率指标值显著大于泰国;而熵权法中以人均需水量、农业用水量、工业用水量、单方水工业产值、有效灌溉面积和森林覆盖率的权重较大,其中泰国的农业用水量、工业用水量、单方水工业产值、有效灌溉面积指标值显著大于老挝。因此两种方法的差异源于不同指标权重以及相应指标值的差异。

表2 指标权重计算

准则层	准则层权重	指标名称	AHP单权重	AHP总权重	熵权法权重
公平性	0.565	流域面积贡献率	0.078	0.044	0.054
		径流贡献率	0.520	0.294	0.056
		人口数量	0.201	0.113	0.063
		人均需水量	0.201	0.113	0.145
现状性	0.262	生活用水量	0.243	0.064	0.063
		农业用水量	0.669	0.176	0.101
		工业用水量	0.088	0.023	0.102
效率性	0.055	单方水工业产值	0.167	0.009	0.128
		有效灌溉面积	0.833	0.046	0.111
可持续性	0.118	人口自然增长率	0.750	0.088	0.063
		森林覆盖率	0.250	0.030	0.114

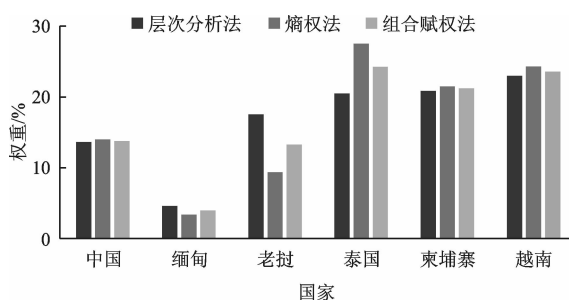


图2 不同方法得出的各国分配水量权重对比

从组合赋权法权重组合系数结果来看,组合比例接近平均加权,其结果接近两种权重结果的均值,考虑到组合赋权法的特点,认为组合赋权法兼顾了主观性和客观性,相比层次分析法和熵权法结果更合理,因此将组合赋权法权重作为最终的水量分配权重,即各国分配水量权重依次为 13.8%、3.98%、13.23%、24.17%、21.16%、23.65%。

4 讨论

以澜湄流域各国的实际用水量(见表3)为基数计算实际用水量占比^[15-16],结果见图3。

表3 澜湄流域各国实际用水量 10^8 m^3

指标名称	中国	缅甸	老挝	泰国	柬埔寨	越南	总计
生活用水	4.10	0.10	2.39	11.23	5.20	5.45	28.47
农业用水	21.43	1.36	39.44	98.09	89.54	259.14	509.00
工业用水	2.15	0.03	0.20	1.40	0.20	1.22	5.20

从图3中各国分配水量权重和实际用水量占比来看,其中越南的实际用水量占比为 48.98%,为分

配水量权重的 2 倍有余,而其他国家的用水量占比均小于分配水量权重。

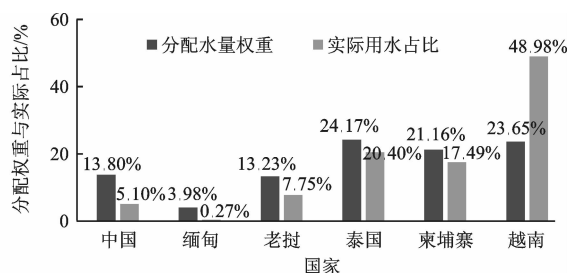


图3 澜湄流域各国分配水量权重、实际用水量占比

建立分配水量权重的目的是合理利用澜湄流域的水资源,由于所建立的水量分配方案与现状用水量占比存在出入,水量分配方案的实施必然导致原有利益的变动,因而需要采取利益补偿与协调措施均衡全流域的水利益分配。单从用水量的角度来看,从图3可知越南消耗了比分配量更多的水量,而其他国家的用水量则少于分配量,因此在利益补偿与协调中,总体上可确定为越南向其他国家进行补偿。根据跨境水资源利用的公平合理利用基本原则,本文所得水量权重可看作未来可能出现的分配水量权重方案。但从我国现状来看,实际用水量不到分配水量权重的一半,因此还有很大的利用空间。

实际上,水量分配是利益分配的体现,澜湄流域的水利益具有多样性,除了水量消耗性利用以外,还有诸如水电、航运、生态、养殖、防洪等非消耗性利用,相应的水利益同时受到水量、水质、水资源调度与管理等多方面因素的影响。随着澜湄合作的进一步深化,合作机制将更加完善,合作领域将更加广泛,这种多元化的合作也将提高水资源利用效率,未来可以通过更多维的合作、共享、补偿等途径实现流域国之间的利益共享与协调。

5 结论

本文采用兼顾主观性与客观性的组合赋权法,通过优化计算得到层次分析法和熵权法的权重组合系数,从而得到了澜沧江-湄公河流域各国的水量分配权重,主要结论如下:

(1)对比各国水量分配权重与实际用水量占比可知,越南用水量远超过分配量,泰国和柬埔寨用水量略低于分配量,中国、老挝和缅甸用水量则远低于分配量,即越南超量利用了其他国家的分配水量,为了流域各国都能公平合理地利用澜湄流域水资源,越南应向其他国家进行利益补偿。

(2)相比传统的层次分析法而言,本研究避免了受主观因素单一影响的局限性,充分挖掘了各指标的客观信息,提高了结果的可信度和客观性,可为我国跨境水资源国际谈判提供决策信息,保障我国在跨境流域的水资源利益。

(3)由于资料限制,本研究在各项准则层中仅考虑了一部分指标,待更完整的关键指标数据补充后,在未来研究中可得到更符合澜湄流域实际的水资源分配结果,可切实提高水资源利用的合理性。

参考文献:

- [1] ROWLAND M. A framework for resolving the transboundary water allocation conflict conundrum [J]. *Groundwater*, 2005,43(5):700-705.
- [2] MELLAH T. Effectiveness of the water resources allocation institution in Tunisia [J]. *Water Policy*, 2018,20(2):429-445.
- [3] 何大明,刘恒,冯彦,等. 全球变化下跨境水资源理论与方法研究展望[J]. *水科学进展*, 2016,27(6):928-934.
- [4] ROOZBAHANI R, ABBASI B, SCHREIDER S, et al. A multi-objective approach for transboundary river water allocation [J]. *Water Resources Management*, 2014,28(15):5447-5463.
- [5] KUCUKMEHMETOGLU M, GULDMANN J M. Multiobjective allocation of transboundary water resources: Case of the Euphrates and Tigris [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2010,136(1):95-105.
- [6] 胡洁,徐中民. 基于多层次多目标模糊优选法的流域初始水权分配——以张掖市甘临高地区为例[J]. *冰川冻土*, 2013,35(3):776-782.
- [7] KAMPRAGOU E, ELEFThERiADOU E, MYLOPOULOS Y. Implementing equitable water allocation in transboundary catchments: the case of River Nestos/Mesta [J]. *Water Resources Management*, 2007,21(5):909-918.
- [8] 冯彦,何大明,李运刚. 基于国际法的跨境水分配关键指标及其特征[J]. *地理学报*, 2013,68(3):357-364.
- [9] 赵萍,汤洁,尹笄. 湄公河流域水资源开发利用现状[J]. *水利经济*, 2017,35(4):55-58+77-78.
- [10] 孙周亮,刘艳丽,刘冀,等. 澜沧江-湄公河流域水资源利用现状与需求分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(4):67-73.
- [11] FENG Yan, HE Daming, BAO Haosheng. Analysis on equitable and reasonable allocation models of water resources in the Lancang-Mekong River Basin [J]. *Water International*, 2004,29(1):114-118.
- [12] 屠酥,胡德坤. 澜湄水资源合作:矛盾与解决路径[J]. *国际问题研究*, 2016(3):51-63.
- [13] LIAO Zhenliang, HANNAM P M. The Mekong game: achieving an all-win situation [J]. *Water Resources Management*, 2013,27(7):2611-2622.
- [14] GOETZ R U, MARTÍNEZ, YOLANDAÀ. Efficiency and acceptance of new water allocation rules: the case of an agricultural water users association [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,601-602:614-625.
- [15] 李奔,张坤,程天矫. 基于层次分析法的澜沧江-湄公河可消耗水量分配[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018,51(5):389-393.
- [16] 文云冬. 澜沧江-湄公河水资源分配问题研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.
- [17] 鲁佳慧,唐德善. 基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价[J]. *水利水运工程学报*, 2018,172(6):107-113.
- [18] 吴小萍,储诚诚,李月光,等. 博弈论在高速公路施工期环境影响评价中的应用[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2012,33(6):36-40.
- [19] 刘艳丽,赵志轩,孙周亮,等. 基于水利益共享的跨境流域水资源多目标分配研究——以澜沧江-湄公河为例[J]. *地理科学*, 2019,39(3):387-393.
- [20] 钟华平,王建生. 湄公河干流径流变化及其对下游的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2011(3):48-52.