

# 基于博弈论组合赋权-TOPSIS 模型的排水权分配研究

沈菊琴<sup>1,2</sup>, 赵盟越<sup>2,3,4</sup>, 王昌盛<sup>5</sup>, 张丹丹<sup>2,3,4</sup>, 詹清清<sup>2,3,4</sup>, 孙付华<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 211100;  
3. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 4. 河海大学环境会计与资产经营管理研究所, 江苏 南京 211100;  
5. 南京证券股份有限公司, 江苏 南京 210017)

**摘要:**在借鉴水权、排污权等稀缺资源分配方法和分配指标构建的基础上,运用协同学理论对排水系统进行机理分析,并遵循公平、效率、可持续发展的原则确定影响指标,通过博弈论集合模型将序关系分析法确定的主观权重和熵权法确定的客观权重进行组合优化,最终构建了博弈论组合赋权-TOPSIS 的排水权分配模型。以苏南运河排水权分配作为分析案例,并将该模型分配结果与序关系分析-TOPSIS 模型和熵权-TOPSIS 模型分配结果进行对比。结果表明:基于博弈论组合赋权-TOPSIS 的排水权分配模型具有可行性、合理性;排水权分配是自然、社会、经济系统协调发展的结果,其中降雨状况和社会水利建设、历史灾害损失等对排水权分配有较大影响;排水权分配结果按照分配额大小依次为常州、无锡、苏州、镇江。

**关键词:**洪水灾害;排水权;博弈论;组合赋权;TOPSIS 法

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2021)02-0042-08

洪水灾害是全球发生最频繁、影响最严重的自然灾害之一<sup>[1]</sup>,近年来我国频繁出现不同程度的洪水灾害,造成巨大的财产损失和人员伤亡。2020 年国家应急管理部发布消息显示:6—7 月汛期洪涝灾害导致全国 5 480 万人次受灾,直接经济损失 1 444.3 亿元,其中 7 月安徽暴雨造成 840.2 万人受灾,直接经济损失 329.9 亿元,7 月湖北暴雨造成 1 354.63 万人受灾,直接经济损失 243.23 亿元。自习近平总书记提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”十六字治水方针以来,加强防洪管理、降低洪水风险,已成为当前重要的治水思想。

在政策层面,我国制定的《国家防汛抗旱应急预案》《中华人民共和国防汛条例》《中华人民共和国防洪法》等政策条例对洪水预防、调度、救灾等方面进行了规范。在执行层面,地方通过修建水库、建筑堤坝等方式建立洪水防御工事,并适时使用调度机制<sup>[2]</sup>。但受区域经济条件、地理位置、来水量差异等影响,当洪水量超过流域可调度范围及工程承载量时,各行政区域争相排水,致使区域内矛盾争议不断<sup>[3]</sup>。目前相关抗洪救灾措施虽可有效降低洪

水灾害,却不能解决在洪水排放过程中行政区域间因维护局部利益而抢夺优先排放权所引发的矛盾<sup>[4-5]</sup>。因此除防洪建设外,政府需建立一种流域整体调节机制,改变洪水无序排放的状况,减少灾害损失,其根本即为在资源(流域可排水总量)有限的情况下,如何协调某时段各行政区域可排放洪水的数值或比例。

灾害发生时,由于各行政区域排水需求大且竞相排水,可排水量成为稀缺资源,为高效、合理配置该稀缺资源,有关专家对排水权进行了研究。立足利益主体角度<sup>[6-7]</sup>,本文将排水权界定为:暴雨天气下,为减少流域灾害损失、实现区域间排水公平、优化整体防洪效益,本级行政管理机关依据可排水总量及排水需求进行洪涝水排放的权利。

## 1 文献综述

目前有关排水权的研究较少。于凤存等<sup>[8]</sup>首次提出排水权的概念,并探讨了排水权配置的公平与效率、可持续发展原则;张劲松等<sup>[9]</sup>结合洪涝灾害的原因,进一步强调了排水权分配的必要性 and 可

基金项目:江苏省社会科学基金(19GLD002);江苏省水利科技项目(2019013)

作者简介:沈菊琴(1962—),女,教授,博士,主要从事水资源技术经济管理、资源环境会计研究。Email:jqshen@hhu.com

行性。在分配方式的研究方面,徐晓晔<sup>[10]</sup>基于空间角度进行排水权分配,但大部分学者以因素分析为主。沈菊琴等<sup>[11]</sup>根据排水权分配目标提出自然、经济、生态等分配指标,并利用混沌优化-投影寻踪法进行排水权分配;Zhang 等<sup>[12-13]</sup>从公平和效率角度,添加了排洪需求、排洪效率等排水权分配影响因素,并将模糊层次分析法与环境基尼系数应用于排水权分配;Sun 等<sup>[14]</sup>基于 PSR 模型建立排水权分配指标,加入地方的应急措施能力状况,并运用物元可拓模型对排水权进行分配。交易机制上,张凯泽等<sup>[15]</sup>尝试从博弈角度构建了政府配置排水权后的交易制度。由此可见关于排水权分配的研究现已引起学术界的重视,但目前分配模型均只适用于某种特定情形,急需探索系统完备的分配方法。与排水权相关的水权、排污权等有限资源分配的研究较为丰富,可为排水权分配方法的构建提供思路。

有限资源分配时通常根据分配内容和分配目标的变化构建差异化指标体系;Cetinkaya 等<sup>[16]</sup>以社会、经济、环境为评估指标,作为水资源分配的参考;胡小飞等<sup>[17]</sup>从人口、经济、环境等角度对排污权初始分配结果进行对比研究;刘佩贵等<sup>[18]</sup>围绕城市供需排水的特点,在增加基本用水保障原则的基础上构建水权分配指标体系;刘艳丽等<sup>[19]</sup>以水利益共享为目标,对跨境水资源进行分配,增加保护弱势群体的协调性分配因素。根据分配目标的变化而增减个别指标,虽然可以实现分配结果与分配目标的一致,但指标体系缺乏系统性。

协同学理论能够根据系统内部演变规律和相互影响寻找序参量指标体系,过程更具有系统性和完整性,在水资源分配与评价中得到了有效应用;刘丙军等<sup>[20]</sup>基于协同学理论将流域分为社会、经济、生态环境子系统,用于水资源配置;吴丹<sup>[21]</sup>利用协同学理论建立指标体系,评价水资源分配的协同效应;周念清等<sup>[22]</sup>根据水资源属性,将水资源系统划分为水循环、社会经济、生态环境子系统,并寻找序参量求出各个指标的权重;姚娜等<sup>[23]</sup>将水资源系统分为水资源、社会经济、生态环境子系统,选取序参量指标对区域水资源可持续利用进行评价。

国内外学者已创建了多种有限资源分配模型并应用于不同的分配情景。Chapman 等<sup>[24]</sup>建立了网格水平衡模型并通过多元回归模型为现有水资源分配建立支持决策系统;为适应不同指标分配,张雷等<sup>[25]</sup>建立了物元可拓模型对水库初始水权进行分配;为对客观数据进行分配,杨芳等<sup>[26]</sup>构建了基于投影寻踪混沌优化算法的流域初始水权分配模型;考虑专家主观判断,展金岩等<sup>[27]</sup>利用模糊层次法解

决水权分配问题。但以上方法存在受数学化限制、指标权重考虑不足、计算工作量大或人为性强等缺点,因此本文考虑将 TOPSIS 逼近理想点来引入排水权初始分配问题,并利用博弈论组合赋权解决赋权片面性的问题。目前 TOPSIS 法被广泛认可并用于水权分配。刘炳明等<sup>[28]</sup>运用改进的 TOPSIS 法对连云港市水权进行分配,结果与实际接近;吴凤平等<sup>[29]</sup>则组合了模糊优选和 TOPSIS 法;张学文等<sup>[30]</sup>将 AHP 与 TOPSIS 相结合对宁夏引黄灌区水资源进行初始分配;熊雪珍等<sup>[31]</sup>采用改进 TOPSIS 法对“五水共治”理念下 4 个区域的水资源配置方案展开评价。

基于学者们对排水权及相关有限资源分配的研究分析,本文结合协同学理论寻找排水系统序参量,构建排水权分配指标体系,运用改进的 TOPSIS 法得出各个行政区域的排水权分配权重。为使指标赋权结果尽可能与实际结果接近,将主观序关系分析法和客观熵权法进行博弈,使权重组合更为合理。

## 2 排水权分配系统协同学特征及序参量指标选取

### 2.1 流域排水系统的构成与协同学特征

协同学是研究协同系统从无序到有序演化规律的新兴综合性学科,适用于非均衡的开放、有序系统。将协同学理论应用于其他学科,可以寻找有关系统的影响因素,发挥各个子系统的协同作用。根据排水系统的自然和人为特征,兼顾经济、社会的协同发展,将排水系统分为自然、社会和经济 3 个子系统。该系统具有协同学的 4 点表现特征<sup>[32]</sup>:

a. 多元非线性。排水系统的各个子系统之间是相互竞争、相互协作的关系。相互竞争体现在避免过量水的排放的竞争,这种竞争使系统远离平衡;相互合作体现在其共同目标是使排水系统重新达到有序状态,以实现洪水的合理排放。

b. 动态平衡。当排水量到达使排水系统发生显著质变的临界点时,排水系统的原有平衡遭到破坏,在各系统调解下会走向新的有序平衡。

c. 自发性。排水系统是复杂的大系统,在没有外力作用和外部干预时,各个系统之间也会发生信息的交换,相互影响。

d. 涨落波动性。排水系统会受到诸如气候变化、人类活动等方面的影响,使得排水区域的排放情况发生变化。可见排水系统的涨落波动性与外界环境和人类活动密切相关,且能够在系统结构的动态调整下趋于有序化发展。

## 2.2 流域排水系统作用机理

排水系统的统一协调是自然、社会和经济 3 个子系统相互作用的结果。其协同演化分为两个阶段:①当排水量较小时,系统演化主要取决于自然降水量、暴雨重现期、影响调蓄的下垫面构成等因素,优先来水量大、自然条件处于劣势的区域排水,可保证多余水量顺利排放。②当排水量达到甚至超过流域水量容纳能力的临界值,排水能力和排水自由度受到限制,社会经济发展受到影响,系统内的经济贡献度、社会存续现状成为决定性因子。

### 2.2.1 自然子系统

自然子系统是影响整个排水系统平衡的关键因素,主要受限于外界自然降雨情况和区域自身下垫面构成对降水量的调蓄状况,经济和社会发展也对其产生一定影响。自然子系统的降水量影响排水性质和系统走向:降水量较小时,通过径流、汇流过程形成可利用水资源,供经济和社会发展使用,此时排水为“利水”;降水量较大时,无法正常汇集排放的“利水”变为“害水”,产生必要的淹没损失,可能造成经济损失、人员伤亡或者生态破坏。

### 2.2.2 社会子系统

社会子系统是促进排水系统协同发展的重要驱动因素,社会人口环境的稳定、水利设施建设的完善、水生态环境治理的高效可以促进区域经济建设和自然发展的推进,同时地区经济发展和降雨状况等自然因素也影响社会子系统的演变方向。

### 2.2.3 经济子系统

经济子系统的发展可以为社会和自然发展提供保障,其一定程度上受限于自然来水的破坏程度和社会建设对经济的保护状况。当来水量超过排水能力时,社会稳定和经济发展之间存在一定的竞争博弈。一方面,为维持较好的经济发展,可能对社会人口环境、社会生态等造成破坏,导致极大的社会不稳定性。另一方面,只考虑社会稳定,区域经济发展必然受到限制,甚至不可恢复。

## 2.3 流域排水系统序参量选取

推动排水系统演化的内在动因和决定性因素为序参量<sup>[33]</sup>,也是影响排水权分配的关键指标。借鉴现有排水权<sup>[9]</sup>、水权、排污权分配原则<sup>[34-35]</sup>,排水权分配遵循公平、效率、可持续发展原则。①公平:流域内各区域因自然因素、经济发展水平、社会现状的不同,应对各种洪涝灾害所需的排水权也存在差异,但区域间的排水竞争一直存在,因此分配过程应保证排水的公平。②效率:在暴雨频发期,能够控制和承受洪水的流域属于稀缺资源,而排水权分配的最终目的是使该资源的价值最大化,实现流域综合效

益的优化,因而分配过程应综合考虑经济、社会等因素,提高排水的效率。③可持续发展:经济社会的发展和治理应与生态环境的保护同步进行,洪水发生时可能伴随着污水的趁机排放、不达标水流入重要保护水源地等问题,对水体、土壤造成损害,因此排水过程应考虑环境保护和发展问题。在遵循以上原则的基础上,寻找排水系统序参量,构建排水权分配评价指标体系,可使分配结果更贴合实际。

### 2.3.1 自然子系统序参量

自然子系统是排水系统演变方向的最初动力,决定了行政区域自身所需的“净”排水能力。一方面,年降水量,尤其是洪水易发的梅雨期降水量、暴雨重现期决定区域的排水需求,由于降雨时空分布不均,降水越丰沛的区域所得排水权越多;另一方面,区域下垫面构成会调整排水量。河湖、水库等水域体系和地面植被绿化可以容纳和调蓄来水,减少本区域向流域的排水量,相反,建成区等不透水地面会加速来水汇集,增加短时所需排水权。

### 2.3.2 社会子系统序参量

社会子系统在保证生命安全的基础上有助于实现排水权分配的公平与效率。人口密度反映区域社会易害性,是影响排水权分配的首要因素。但在人口构成中,高素质人口能够利用自身经验来抵御洪水风险,降低易害性,而弱势群体应急能力差,需要更多的排水权才能保证生命安全。社会水利建设的加强可扩大整个流域的排水容量、增强排水控制,进而提高排水效率,而社会水利建设通常包含水利建设投资、堤防总长度、排水管道长度、除涝面积等。被污染的排水可能会造成流经区域的土壤污染、水质恶化等生态问题,并进一步对人体健康造成威胁。基于可持续发展和公平视角,应为水质管理能力较好的区域提供较多的排水权。该分配方式将形成激励效应,区域为获得更多的排水权,必然会加强本地污水处理率,加强水质管理等,以提高水质,获得更多的排水权。

### 2.3.3 经济子系统序参量

行政区域经济子系统由两部分构成:一是经济发展潜力,反映现期经济建设情况和未来经济发展贡献值。洪涝灾害通常会造企业停产、资产损坏、居民生活水平下降等经济问题,尽量减少这些损失的发生,有助于优化流域综合效益。经济发展潜力可通过人均 GDP、恩格尔系数、城镇化率、就业率、居民人均可支配收入等确定。二是历史灾害损失,由直接经济损失、农作物受灾面积和受灾人口确定,反映了该地区经济易受损程度和历史受灾状况,代表了该地区在排水权分配中的利益诉求,能够降低

排水权分配的不合理性。

选取的排水系统序参量指标类型及释义如表 1 所示。

### 3 排水权分配模型构建

#### 3.1 确定指标权重

##### 3.1.1 熵权法确定客观权重

熵权法计量客观权重的核心是通过熵值度量信息量大小。某指标信息量越大则对决策作用越大,反之越小<sup>[36]</sup>。计算步骤如下。

a. 对每个指标数据进行无量纲化处理,构建决策矩阵  $Z = (z_{ij})_{n \times m}$ ,  $z_{ij}$  为

$$z_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $p_{ij}$  为不同地点的分配指标值;  $n$  为分配指标数;  $m$  为分配地点数。

b. 定义指标熵权  $e_i$ :

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m z_{ij} \ln z_{ij} \quad (2)$$

c. 计算指标客观权重  $u_{ai}$ :

$$u_{ai} = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (3)$$

#### 3.1.2 序关系分析法确定主观权重

排水权分配是子系统竞争博弈的过程,也是对各个影响指标进行重要性排序的过程。采用郭亚军等<sup>[37]</sup>提出的序关系分析法进行主观赋权。计算步骤如下。

a. 确定序关系。专家或决策者按照重要性对指标由大到小依次排序,记为  $p_1^* > p_2^* > \dots > p_n^*$  ( $>$  表示前者重要性优于后者)。

b. 确定相邻指标重要性程度。专家或决策者对分配指标  $p_{i-1}^*$  与  $p_i^*$  的重要程度之比  $R_i$  的理性判断如下:

$$R_i = p_{i-1}^*/p_i^* \quad (i = n, n-1, \dots, 2) \quad (4)$$

c. 求解指标权重。根据  $R_i$  的理性赋值及权重相加和为 1 的要求,指标主观权重  $u_{bi}$  满足:

$$\begin{cases} u_{bn} = (1 + \sum_{i=2}^n \prod_{d=i}^n R_d)^{-1} \\ u_{bi-1} = R_i u_{bi} \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.1.3 基于博弈论的组合赋权

博弈论是研究竞争性事物的理论和方法,帮助决策者在竞争事物间权衡并做出理性决策。使用序关系分析法和熵权法的博弈论组合赋权方法,在不同权重间寻找妥协或一致,使指标赋权最优化,计算

表 1 排水系统序参量指标类型及释义

系统	因素	序参量指标	单位	类型	指标释义
自然	降雨	年降水量	mm	正	反映来水量大小,决定行政区域年度排水量
		梅雨期降水量	mm	正	洪涝灾害的诱因,决定洪灾易发期内行政区域排水量
		最大 7 d 暴雨重现期	a	正	洪涝灾害易发生程度,反映该暴雨的强度大小
	下垫面	水面率	%	反	水域面积/地域面积,比率越大本地区调蓄能力越强,向流域排水需求减少
		不透水面积率	%	正	建成区面积/地域面积,比率越大来水的径流和汇流速度越快
		绿化覆盖率	%	反	绿化面积/地域面积,比率越大容纳来水的能力越强
人口	人口密度	人/km <sup>2</sup>	正	常住人口总数/占地面积,比率越大人群越聚集,受保护程度越高,所需排水量越大	
	弱势人口比率	%	正	65 岁以上及 14 岁以下人口数/总人口,比率越高适应灾害能力越差	
	高等素质教育人口比率	%	反	高等学校学生数/总人口,比率越高抵御并适应灾害能力越强	
社会	水利设施建设	水利建设投资	万元	正	投资额越多,设施越健全,越有利于流域整体排水
		堤防总长度	km	正	堤防越长,应对来水的能力越强,越便于整体排水安排
		排水管道长度	km	正	排水管道越长,汇集和排放雨水能力越强,越便于流域控制排水
		除涝面积	km <sup>2</sup>	反	除涝面积越大,行政区域治涝防涝工程建设越完善,抵御洪涝能力越强
水质管理	污水处理率	%	正	污水处理量/产生量,代表地区对污染的重视程度和处理能力,污水处理率越高对流域生态破坏度越低	
	Ⅲ类及以上标准水质断面比率	%	正	Ⅲ类及以上标准河流断面数/总断面数,代表当地对水质的管理水平,该比率越高对水资源保护和水体污染控制越好	
	水功能区水质达标率	%	正	河湖达标数量/总数量,该比率越高水质治理越好,越有利于生态保护	
经济	经济发展潜力	人均 GDP	元	正	总产出/总人口,该数值越大,地区经济创造值越大,恢复力度越大
		恩格尔系数	%	正	平均食品支出总额/平均家庭支出总额,反映当地富裕程度
		居民人均可支配收入	万元	正	反映居民生活水平和经济状况,该数值越大经济创造力越大
		就业率	%	正	就业人数/常住人口数,反映社会经济效益和地区发展潜力
		城镇化率	%	正	城镇人口/总人口,反映地区城镇化水平,该比例越高保护程度越高
历史灾害损失	直接经济损失	农作物受灾面积	km <sup>2</sup>	正	洪灾造成农作物受灾情况,该数值越大越不利于地区生产建设
		受灾人口	万人	正	洪灾造成受灾人口数量,该数值越大洪灾对地区人口威胁性越大

步骤如下。

a. 确定权重组合。设有  $L$  种方法对指标赋权,则得到权重向量  $\mathbf{u}_k = [u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}] (k = 1, 2, \dots, L)$ 。记  $L$  个权重向量的任意组合为

$$\mathbf{u} = \sum_{k=1}^L \alpha_k \mathbf{u}_k^T \quad (\alpha_k > 0) \quad (6)$$

式中: $\alpha_k$  为线性组合系数; $\mathbf{u}$  为一种可能组合权重。

b. 优化对策模型。基于博弈论组合赋权的基本思想,优化的对策模型为

$$\alpha_k = \min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k \mathbf{u}_k^T - \mathbf{u}_g \right\|_2 \quad (g = 1, 2, \dots, L) \quad (7)$$

c. 求最优组合系数  $\alpha_k$ 。式(7)的最优化一阶导数条件可转换为如下方程组,并计算得到组合系数集  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L\}$ 。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1^T & \dots & \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_L^T \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{u}_L \cdot \mathbf{u}_1^T & \dots & \mathbf{u}_L \cdot \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{u}_L \cdot \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

d. 计算组合权重  $\mathbf{u}^*$ 。对  $\alpha_k$  进行归一化处理,最后得出  $\mathbf{u}^*$  :

$$\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k \quad (9)$$

$$\mathbf{u}^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \mathbf{u}_k^T \quad (10)$$

### 3.2 计算分配比例流程

a. 构建决策矩阵。将决策矩阵归一化处理,按照正负指标分别计算,构建决策矩阵:

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m} \quad (11)$$

$$\text{其中 } x_{ij} = \begin{cases} \frac{p_{ij} - p_{j\min}}{p_{j\max} - p_{j\min}} & \text{越大越优型} \\ \frac{p_{j\max} - p_{ij}}{p_{j\max} - p_{j\min}} & \text{越小越优型} \end{cases}$$

将标准化决策矩阵与组合权重相乘,得到加权标准化决策矩阵  $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{n \times m}, y_{ij}$  为

$$y_{ij} = u_i x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

b. 确定最理想加权评价价值集合  $Y^+$  和最不理想加权评价价值集合  $Y^-$  :

$$\begin{cases} Y^+ = \{(\max_j y_{ij} \mid i \in I_1), \\ (\min_j y_{ij} \mid i \in I_2) \mid j = 1, 2, \dots, n\} = \\ \{y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+ \mid i = 1, 2, \dots, n\} \\ Y^- = \{(\min_j y_{ij} \mid i \in I_1), \\ (\max_j y_{ij} \mid i \in I_2) \mid j = 1, 2, \dots, n\} = \\ \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^- \mid i = 1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $I_1$  为越大越优型指标集合; $I_2$  为越小越优型指标集合。

c. 计算每一区域方案与正、负理想解之间的距离:

$$\begin{cases} S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - y_i^+)^2} \\ S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - y_i^-)^2} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

d. 确定相对权数。各区域的评价价值与最理想评价集合和最不理想评价集合之间的相对权数为

$$C_j = S_j^- / (S_j^+ + S_j^-) \quad (15)$$

e. 计算各行政区域分配比例:

$$q_j = C_j / \sum_{j=1}^m C_j \quad (16)$$

## 4 案例分析

苏南运河是京杭大运河“黄金水道”的重要组成部分,流经苏州、无锡、常州和镇江 4 市。近几年苏南运河流域雨涝年份连续出现,各行政区域出于自身利益考虑,纷纷将涝水排向运河,导致运河沿线水位不断增高,加之沿线某些洪水排放管道受阻、太湖水源地环境不可破坏等原因,运河沿岸区域洪水排放与运河自身容纳量有限的矛盾日益突出<sup>[13]</sup>。为有效实现政府的调度调配,实现苏南运河整体利益的协调发展,利用博弈论组合赋权-TOPSIS 的方法对苏南运河苏州、无锡、常州和镇江 4 市排水权进行合理分配。由于 2016 年苏南运河发生流域性特大洪水,水位突破历史极值,因而作为典型年进行案例分析。

### 4.1 指标权重的计算

根据对排水系统机理分析确定的序参量指标,搜集 2016 年苏州、无锡、常州和镇江 4 市《统计年鉴》《水资源公报》《环境状况公报》等文件的数据、水文水资源勘测局统计数据见表 2。

排水权分配前需要求解各个指标权重。计算客观权重时,首先根据式(1)对表 1 数据进行预处理,之后运用式(2)(3)求解熵值和指标客观权重。计算主观权重时,邀请专家根据相关信息和历史经验对指标重要性做出理性判断,对其重要性程度之比赋值,并根据式(4)(5)求解。最后根据求解的主观数据和式(6)~(10),计算得出博弈论方法下的组合赋权值。不同方法下排水权分配指标权重结果见表 3。各个计算步骤均通过 MATLAB 编程实现。

表 2 排水权初始分配指标样本值

城市	自然子系统			社会子系统				
	降雨			地质		人口		
	年降水量/mm	梅雨期降水量/mm	最大7d暴雨重现期/a	水面率/%	不透水面积率/%	绿化覆盖率/%	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	弱势人口比率/%
苏州	1745.50	684.50	6	36.60	5.33	42.00	1229.92	17.72
无锡	1890.40	587.60	50	27.81	7.18	43.00	1411.07	19.79
常州	2089.30	632.90	77	16.76	5.97	43.10	1076.68	21.29
镇江	1996.10	561.90	29	16.54	5.58	42.89	828.46	20.66

  

城市	社会子系统							
	人口		水利设施建设			水质		
	高素质教育人口比率/%	水利建设投资/万元	堤防总长度/km	排水管道长度/km	除涝面积/km <sup>2</sup>	污水处理率/%	Ⅲ类及以上标准水质断面比率/%	水功能区水质达标率/%
苏州	2.06	32.00	7418.25	13212	1430.3	95.18	64.00	75.50
无锡	1.74	20.00	2213.97	13105	766.3	91.00	29.41	66.70
常州	2.63	55.00	2656.95	5880	672.2	96.30	42.40	61.60
镇江	2.75	12.90	1293.32	2016	570.2	81.30	78.20	77.10

  

城市	经济子系统					历史灾害损失		
	经济发展潜力			城镇化率/%		直接经济总损失/亿元	农作物受灾面积/km <sup>2</sup>	受灾人口/万人
	人均GDP/元	恩格尔系数/%	居民人均可支配收入/万元	就业率/%	城镇化率/%			
苏州	145556	10.43	4.66	64.93	75.50	1.55	16.88	3.07
无锡	141258	28.00	4.28	59.27	75.80	5.13	229.71	20.13
常州	122721	11.12	3.84	59.77	71.00	52.60	543.81	26.99
镇江	120603	29.00	3.41	61.08	69.20	8.79	205.37	7.45

表 3 排水权分配指标权重

排水权分配指标	主观权重 $u_{bi}$	客观权重 $u_{ai}$	组合权重 $u^*$
人口密度	0.1225	0.0077	0.0418
最大7d暴雨重现期	0.1114	0.1035	0.1058
梅雨期降水量	0.0857	0.1022	0.0973
年降水量	0.0857	0.0012	0.0263
水利建设投资	0.0714	0.0009	0.0219
堤防总长度	0.0595	0.0925	0.0827
排水管道长度	0.0541	0.0586	0.0573
除涝面积	0.0492	0.0246	0.0319
水面率	0.0492	0.0029	0.0166
不透水面积率	0.0410	0.0774	0.0666
绿化覆盖率	0.0410	0.0298	0.0331
直接经济总损失	0.0341	0.0000	0.0102
农作物受灾面积	0.0285	0.2733	0.2006
受灾人口	0.0285	0.1375	0.1051
弱势人口比率	0.0237	0.001	0.0077
高素质教育人口比率	0.0216	0.007	0.0113
人均GDP	0.0180	0.0009	0.0060
恩格尔系数	0.0138	0.0015	0.0051
居民人均可支配收入	0.0126	0.0451	0.0354
就业率	0.0126	0.0003	0.0040
城镇化率	0.0105	0.0272	0.0223
污水处理率	0.0105	0.0018	0.0043
Ⅲ类及以上标准水质断面比率	0.0081	0.0029	0.0044
水功能区水质达标率	0.0073	0.0003	0.0024

4.2 各行政区域分配比例的计算

将排水权分配指标数据无量纲化处理后与组合权重相乘,得到加权标准化决策矩阵。通过公式

(13)~(16)求出正、负理想解之间的距离后,计算出博弈论组合赋权-TOPSIS模型下排水权分配比例。同时采用不同赋值方法下的TOPSIS模型对苏南运河进行排水权分配,与博弈论组合赋权-TOPSIS模型下排水权分配进行对比分析,结果见表4。

表 4 不同排水权分配方法结果对比

城市	基于熵权-TOPSIS模型	基于序关系分析法-TOPSIS模型	基于博弈论组合赋权-TOPSIS模型
苏州	0.1723	0.2417	0.1893
无锡	0.2088	0.3038	0.2314
常州	0.4768	0.3207	0.4409
镇江	0.1421	0.1338	0.1384

4.3 结果分析

根据分析计算,得出苏南运河流域各行政区的排水权分配结果:苏州(0.1893)、无锡(0.2314)、常州(0.4409)、镇江(0.1384)。从指标博弈论组合赋权结果来看,自然子系统中最大7d暴雨重现期(0.1058)、梅雨期降水量(0.0973),社会子系统中堤防总长度(0.0827),经济子系统中农作物受灾面积(0.2006)、受灾人口(0.1051),均在指标中占有较大比重,是排水权分配过程中需要着重关注的因素。从表1的样本数据可以看出,赋权重较高的重要性正向指标值除社会因素外,在常州、无锡、镇江、苏州4市递减,而社会因素中的堤防总长度苏州极高,最终导致其排水权分配值常州大于无锡大于苏

州大于镇江的现象。

为了验证基于博弈论组合赋权-TOPSIS 模型下排水权分配的合理性,分别运用不同赋权下的 TOPSIS 分配方法进行苏南运河流域的排水权分配,分配结果对比见表 4。由表 4 可以看出,基于熵权-TOPSIS 模型、基于序关系分析法-TOPSIS 模型和基于博弈论组合赋权-TOPSIS 模型的分配结果大体一致:排水权分配均为常州大于无锡大于苏州大于镇江的现象,且常州占比较高。分析其原因,主要是历史农作物受灾面积、受灾人口、最大 7 d 暴雨重现期等主导因素在 4 个区域间有较大差距,且常州、无锡的数值较高。但 3 种方法下的分配比例略有不同:①熵权法因过于依赖数据指标,导致数据差值越大,分配比例差距越大的极端现象,不能体现指标间的重要性程度。如排水管道长度和人均 GDP 数值均较大,但因重要性不同对分配比例会产生不同的影响,但其在熵权法中无法判断。②序关系分析法下邀请专家根据经验和知识进行重要性排序,缩小了 4 市间的分配差距,但未能挖掘出数据间的内在规律且存在一定主观性。③博弈论组合赋权法下的分配结果综合了主、客观赋权的优点,既关注指标的重要性,又能体现数据的内在规律,使得分配结果更加合理。

排水权的分配结果是建立在区域自然、社会和经济协调发展的基础之上。对于苏南运河流域而言,自然降雨状况和历史灾害损失、水利设施建设在其中起到尤为重要的引导作用。而污水处理、就业率等指标的引导作用较弱。可见,在洪水雨涝自然灾害情况下,降雨状况和易受害程度是排水权分配中需着重考虑的因素。

## 5 结论

在分析排水权分配必要性的基础上,本文借鉴了水权、排污权等有限资源的分配方法,通过协同学理论寻找排水系统中自然子系统、社会子系统、经济子系统的序参量指标,构建博弈论组合赋权-TOPSIS 模型对排水权进行分配,并将其运用于苏南运河流域苏州、无锡、常州和镇江 4 市进行分配研究,得如下结论:

a. 排水系统实现统一协调效应的核心是对自然子系统、社会子系统和经济子系统的整体调控。不同时间段的排水系统呈现不同的宏观现象,系统中的序参量指标决定着排水权分配的结果。通过机理分析共选取 24 个影响指标,这些指标易于测量,便与获取,提高了分配结果的准确性。

b. 构建的博弈论组合赋权-TOPSIS 模型排水权

分配方法,弥补了主观赋权的随意性和客观赋权数据依赖性的缺点,使分配结果更加合理。案例分析中用基于熵权-TOPSIS 模型、基于序关系分析法-TOPSIS 模型和基于博弈论组合赋权-TOPSIS 模型 3 种赋权方法对苏南运河流域镇江、常州、无锡和苏州 4 市的排水权分配结果进行对比,结果显示组合赋权方法下的分配结果综合了专家经验及客观数据,更具有借鉴意义。

c. 排水权分配是以极端天气发生的特定期间为前提,目标是实现流域损失最小化、效益最大化。案例分析中常州的分配比例远高于苏州、常州、镇江,分析其原因一是因为最大 7 d 暴雨重现期等指标赋值比例较高,二是因为常州的多数样本数值远高于苏州、无锡、镇江。该分配结果符合排水权分配的目标,验证了该分配方法的可行性。

d. 博弈论组合赋权-TOPSIS 模型的排水权分配方法为流域排水权初始分配提供了新思路,案例分析的结果为完善防汛排水体系提供了方向和参考。公平高效的排水权分配方式可以为区域减少洪涝损失,并为排水权交易鉴定基础。

## 参考文献:

- [1] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6.
- [2] 胡俊锋,杨月巧,杨佩国. 基于减灾能力评价的洪涝灾害综合风险研究[J]. 资源科学,2014,36(1):94-102.
- [3] 刘洋,李诚志,刘志辉,等. 基于 WRF 模式的新疆巴音布鲁克盆地强降雨天气数值模拟效果分析[J]. 干旱区研究,2016,33(1):28-37.
- [4] 靳少波,李季. 水库调度与防洪度汛技术发展现状与展望[J]. 大坝与安全,2017(2):33-40.
- [5] 康玲,周丽伟,李争和,等. 长江上游水库群非线性安全度防洪调度策略[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):1-5.
- [6] 陈广华,黄野. 民法典视阈下水权制度之检讨与重构[J]. 西部法学评论,2018(2):1-9.
- [7] 崔建远. 水权与民法理论及物权法典的制定[J]. 法学研究,2002(3):37-62.
- [8] 于凤存,王友贞,袁先江,等. 排水权概念的提出及基本特征初探[J]. 灌溉排水学报,2014,33(2):134-137.
- [9] 张劲松,张春松,刘丽君,等. 江苏省排水权配置及交易的必要性及可行性[J]. 水资源保护,2019,35(6):25-28.
- [10] 徐晓晔. 基于流域蓄滞洪区补偿机制创新的排水权空间配置初探[D]. 南京:南京大学,2019.
- [11] 沈菊琴,李琳,张凯泽,等. 基于混沌优化-投影寻踪的排水权初始配置研究[J]. 资源与产业,2019,21(6):39-47.
- [12] ZHANG Dandan, SHEN Juqin, SUN Fuhua, et al. Source

- research on the allocation of flood drainage rights of the Sunan Canal based on a bi-level Multi-Objective Programming Model[J]. *Water*,2019, 11(9):1769.
- [13] ZHANG Dandan, SHEN Juqin, LIU Pengfei, et al. Use of fuzzy analytic hierarchy process and environmental Gini Coefficient for allocation of regional flood drainage rights [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2020(17):6.
- [14] SUN Fuhua, LAI Xiuping, SHEN Juqin, et al. Initial allocation of flood drainage rights based on a PSR model and entropy-based matter-element theory in the Sunan Canal, China[J]. *PloS ONE*,2020(15):6.
- [15] 张凯泽,沈菊琴. 准市场下我国排水权交易管理研究: 基于演化博弈视角[J]. *河南大学学报(社会科学版)*, 2019,59(4):21-29.
- [16] CETINKAYA C P, GUNACTI M C. Multi-criteria analysis of water allocation scenarios in a water scarce basin[J]. *Water Resources Management*,2018, 32(8):2867-2884.
- [17] 胡小飞,傅春. 鄱阳湖流域排污权初始分配模式的比较研究[J]. *长江流域资源与环境*,2015,24(5):839-845.
- [18] 刘佩贵,冯源,尚煜廷,等. 个考虑水量和排污量的城市二维初始水权分配优化模型[J]. *中国农村水利水电*, 2019(3):1-4.
- [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] 刘丙军,陈晓宏. 基于协同学原理的流域水资源合理配置模型和方法[J]. *水利学报*,2009,40(1):60-66.
- [21] 吴丹. 流域初始二维水权耦合配置系统评价[J]. *水利水电科技进展*,2013,33(4):36-40.
- [22] 周念清,赵露,沈新平. 基于协同学理论评价湘江流域水资源系统适应性[J]. *人民长江*,2012,43(24):9-12.
- [23] 姚娜,陈方,甘升伟,等. 协同学在水资源可持续利用评价中的应用研究[J]. *水文*,2017,37(6):29-34.
- [24] CHAPMAN A R, KERR B, WILFORD D. A water allocation decision-support model and tool for predictions in un-
- gauged basins in Northeast British Columbia, Canada[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018,54(3):676-693.
- [25] 张雷,仕玉治,刘海娇,等. 基于物元可拓理论的水库初始水权分配研究[J]. *中国人口·资源与环境*,2019,29(3):110-117.
- [26] 杨芳,肖淳,邵东国,等. 基于投影寻踪混沌优化算法的流域初始水权分配模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014,47(5):621-624.
- [27] 展金岩,赵梓淇,张舒. 基于模糊层次分析法的区域水量分配[J]. *水利科技与经济*,2017,23(3):39-41.
- [28] 刘炳明,张庆波,王海青. 基于改进 TOPSIS 法的水资源确权分配模型及应用研究[J]. *地下水*,2018,40(6):189-191.
- [29] 陈艳萍,吴凤平,吴丹. 基于模糊优选和 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2009,37(4):467-471.
- [30] 张学文,马海峰. 宁夏引黄灌区水权初始分配模型应用研究[J]. *中国水利*,2011(15):31-33.
- [31] 熊雪珍,何新玥,陈星,等. 基于改进 TOPSIS 法的水资源配置方案评价[J]. *水资源保护*,2016,32(2):14-20.
- [32] 李爱花,李原园,郗建强. 水资源与经济社会及生态环境系统协同发展初探[J]. *人民长江*,2011,42(18):117-121.
- [33] 李玉龙,韦雅尹,李桂君,等. 协同视角下的北京市水资源系统可持续性评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019,29(3):71-80.
- [34] 吴凤平,葛敏. 水权第一层次初始分配模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2005,33(2):216-219.
- [35] 郑君君,王向民,王璐. 公平与效率视角下排污权有偿分配机制的实验研究[J]. *郑州大学学报(哲学社会科学版)*,2018,51(3):58-63.
- [36] 郭明晶,卜炎,陈从喜,等. 中国天然气安全评价及影响因素分析[J]. *资源科学*,2018,40(12):2425-2437.
- [37] 陈陌,郭亚军,于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. *系统管理学报*,2011,20(3):352-355.

(收稿日期:2020-07-22 编辑:胡新宇)

(上接第 29 页)

- [18] 王亚华,舒全峰,吴佳喆. 水权市场研究述评与中国特色水权市场研究展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017,27(6):87-100.
- [19] MALIN F. Water management and ecosystem: ling with change[EB/OL]. (2006-11-21) [2020-03-15]. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/TEC9>.
- [20] SAVENIJE H H G, ZAAG P V D. Integrated water resources management: concepts and issues [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*,2008,33(5):290-297.
- [21] GALLEGO A J, JUIZO D. Strategic implementation of integrated water resources management in Mozambique: an A'WOT analysis[J]. *Physics and Chemistry of the Earth* Parts A/b/c, 2011,36(14-15):1103-1111.
- [22] 沈满洪,陈军,张蕾. 水资源经济制度研究文献综述[J]. *浙江大学学报(人文社会科学版)*,2017,47(3):71-83.
- [23] 高坚,吴洋洋,邢西金. 水资源管理制度背景下水资源配置情况[J]. *资源节约与环保*,2019(11):29.
- [24] 马永欢,刘清春. 对我国自然资源产权制度建设的战略思考[J]. *中国科学院院刊*,2015,30(4):503-508.
- [25] SHEN D, SPEED R. Water resources allocation in the People's Republic of China[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2009, 25(2): 209-225.
- [26] 刘峰,段艳,马妍. 典型区域水权交易市场案例研究[J]. *水利经济*,2016,34(1):23-27,83.

(收稿日期:2020-04-05 编辑:罗丹)