

基于奖惩机制的流域生态优先水资源多主体合作配置模型

余 璐¹, 牛文娟¹, 王丹丹¹, 薛刘宇^{1,2}, 仇 蕾¹

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省南水北调工程建设领导小组办公室, 江苏 南京 210029)

摘要:从生态保障到生态优先,是经济高质量发展对流域水资源配置的时代要求。从生态优先的视角,构建流域水资源多主体合作配置模型,综合多属性指标体系、指标权重设计和DEA方法实现模型的奖惩机制,并以南四湖流域为例验证了模型的有效性,旨在以生态优先下水资源分配奖惩机制的设计与模型实现,引导流域地方政府走“节约用水,经济转型,生态保护”的高质量发展之路。

关键词:生态优先;水资源配置;奖惩机制;DEA合作博弈;南四湖流域

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2023)01-0040-07

水是生命之源、生产之要、生态之基。我国人均水资源相对匮乏,时空分布不均,并随着经济高质量发展转型,区域之间、行业之间、经济与生态之间的水资源供需不平衡态势日益加剧^[1]。作为一种准公共物品,流域水资源涉及众多利益主体,长期面临“公地悲剧”难题,多主体之间利益目标诉求的不一致引发水资源无序竞争甚至是水资源冲突^[2],争夺水资源的冲突事件时有发生,如环鄱阳湖经济圈多个市县的“抢水大战”,长江流域的水资源冲突等^[2]。究其原因,水资源冲突是水资源配置失效的结果,解决冲突有必要针对有限的水资源进行科学有效的配置。

国内外关于水资源配置的研究由来已久。20世纪80年代初,我国学者华士乾等^[3]对水量空间分布的研究成为我国水量配置研究的开端。经济主导的发展模式,决定了水资源配置目标主要是追求经济效益最大化^[4],对生态环境的保护停留在河道内和河道外生态基流保障层面。不可持续的经济发展模式引发全方位的水资源和生态环境问题,生态优先逐渐成为经济社会发展的全民共识^[5],并以国家制度的形式加以巩固确定。然而,在水资源配置领域,生态优先的理念尚未实现,尽管学者们已经意识到以水资源配置解决生态问题的重要性,但已有研究只是满足保证生态基流和生态需水的基本目标,即基本生态需水保障(下文

简称为“生态保障”)。生态保障与生态优先从理念和技术实现上存在本质不同,本文将对此加以阐释,并在水资源配置模型和方案中实现生态优先目标,激励地方政府在注重经济发展的同时自觉落实生态优先战略,在经济发展与生态环境保护的发展目标冲突中取得平衡。

基于多属性特征指标体系构建流域水资源配置模型是获得水资源配置方案的一种方法^[6]。DEA(Data Envelopment Analysis,数据包络分析)模型用于衡量同质决策单元的相对效率,在水资源管理领域,大多数现有的研究都集中在使用DEA模型进行水资源利用效率的评估^[7-8],也有基于DEA的资源配置研究^[9-10]。基于博弈论的水资源配置注重各决策主体在水资源配置中的相互协调,越来越多的学者建立了基于合作^[11-14]或非合作^[15-16]博弈的水资源优化配置模型。一些国内外学者将DEA模型与博弈论相结合,建立DEA博弈模型^[17-18],既考虑多主体的利益协调,又注重资源配置单元的相对效率。

本文构建的DEA合作博弈水资源配置模型,对上述模型和思想进行有机集成,在传统的多属性指标体系水资源配置模型中引入生态优先指标和DEA博弈模型,通过指标权重设计和DEA博弈实现对水资源配置合作主体的奖惩机制以达到生态优先目标,引导地方政府在利用水资源发展社

基金项目:江苏省水利科技项目(2020044);国家自然科学基金青年科学基金(71704068)

作者简介:余璐(1998—),女,硕士研究生,主要从事水资源管理研究。E-mail:yuluhu@163.com

通信作者:牛文娟(1972—),女,副教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:longmanok@126.com

会经济的同时注重生态优先。奖惩机制旨在通过奖励和惩罚措施促使用水主体做出有益于生态优先的行为,已有研究表明,奖惩机制的组合能够达到最大的激励效果^[19]。

本文以生态优先视角,融合多属性指标、DEA模型和合作博弈理论,构建基于奖惩机制的流域生态优先水资源多主体合作配置模型,并以南四湖流域为例验证了模型的有效性。

1 基于奖惩机制的流域生态优先水资源多主体合作配置模型构建

1.1 从生态保障到生态优先

生态保障,即在水资源配置的过程中,以Tennant等方法预测流域河道内和河道外生态基流并预留相应生态水量,以释放某个百分比的生态流量来维持或恢复天然状态下水生生态系统结构和功能的完整性^[20]。在生态优先度不高的历史时期,生态基流方法可以保障流域生态管理的战略目标。

生态优先则是与生态保障从内涵到外延均本质不同的概念。生态优先对社会经济发展、水资源开发利用以及生态环境保障都提出了更高的要求,从水资源管理方面包括节约用水、水质保护、水生态恢复等内容,从社会经济发展方面包括产业升级、经济结构转型等内容,生态环境保护则被提高到国家安全战略层面的高度。总而言之,生态优先就是以水资源的科学管理和高效利用实现社会经济发展和生态环境保护的良性互动和永续和谐。可见,生态优先比生态保障具有更加丰富的内涵、内容和外延,对水资源配置提出更高的要求。

传统水资源配置中的生态保障仅将生态基流作为一种合意产出,而本文提出的水资源配置模型则提出在生态优先视角下考虑节约用水、污水治理、用水效率、经济转型等多种合意或非合意产出,以构建多属性指标体系表达生态优先的丰富内涵和内容,对合意产出进行激励,对非合意产出进行惩罚,以奖惩机制实现水资源配置目标,保障社会经济活动中的生态优先战略地位和现实可操作性。

1.2 基于奖惩机制的生态优先水资源配置设计思想与技术实现

随着社会经济持续发展,用水主体对水资源的需求量逐渐增加,加剧了流域水资源的争夺。在制定水资源配置策略时,中央与地方对于生态优先的偏好不一致,分权化改革导致地方政府仍以经济发展为首要目标^[21],尽管中央政府制定了生态优先的政策导向,但由于央地政府信息不对称,且生态环境

的改善具有长期性且难以量化地方政府官员的政绩,中央政府难以抑制地方政府的功利性动机,必须通过机制设计引导地方政府的行为。因此,本文提出基于奖惩机制的水资源配置模型,将经济发展必不可少的水量与生态环境保护情况挂钩,引导地方政府在发展经济之前必须首先落实生态优先战略,从长远看,奖惩机制有利于引导地方政府在重视经济发展的同时,持续性地将生态放在更加优先的位置,走“节约用水,经济转型,生态保护”的高质量发展之路。

基于奖惩机制的生态优先水资源配置模型是通过结合多属性指标体系及其权重设置、DEA模型和合作博弈模型实现的。多属性指标包含正向与负向指标,分别对应奖励与惩罚,同时多属性指标作为DEA模型的输入,将政策导向性的目标赋予更高权重,例如奖励生态环境保护状况更优的地区分配更多水资源。在不合作的情境下,地方政府(也即用水主体)会选择将自身表现最优的指标赋予更高权重以获得更多水资源。然而在奖惩机制的作用下,地方政府必须考虑在多属性评价指标对应的用水行为中进行平衡,要发展经济,必须将生态优先排在重要位置,顺应中央政府政策要求下的用水行为,例如增强扩大地区绿化面积、建设节水工程等行为提高政策奖励指标值,以便在配置中获得更多的水量,满足地方发展需求。

1.3 DEA合作博弈水资源配置模型

为解决多主体间的利益分配问题,Nakabayashi等^[17]提出了一种将DEA与博弈论相结合以达成主体间共识的模型,并将其称为“DEA博弈”。他们研究了多标准情况下,多个个体之间如何达成一致协议的问题,将多个决策单元(DMU)视为局中人,并各自拥有不同的标准,通过考虑个体间的合作博弈,进行利益分配。本文基于此研究成果,构建了多主体水资源配置的DEA合作博弈模型,配置过程如图1所示,每个用水主体是DEA博弈的一个决策单元DMU, $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ 为用水主体 j 的 m 个指标的值, $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{mj}$ 为每个输入指标的权重,根据输入指

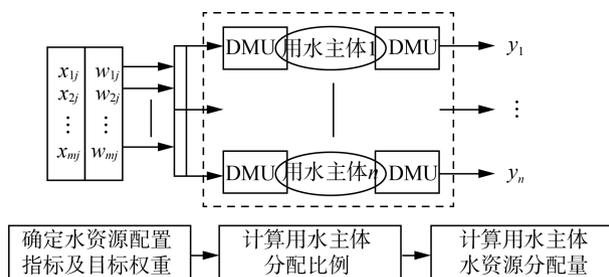


图1 水资源配置过程

标和权重可以计算出分配给每个用水主体的水量 y_1, y_2, \dots, y_n , 多标准和权重由中央政府和用水主体协商确定。

决策矩阵 $X = (x_{ij}) \in \mathbf{R}_+^{m \times n}$ 是由用水主体 j 对评价指标 i 的值 x_{ij} 组成, 假设一个指标的值越高, 则用水主体对于该指标的表现就越好。

对该决策矩阵 X 进行归一化处理, 即:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\forall i) \quad (2)$$

每个用水主体 j 都有权利选择一系列非负权重 $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{mj}$, 该一系列非负权重是每个用水主体 j 基于不同规划选择的对自己最有利的权重。在确定权重之后, 即可得到每个用水主体的相对得分:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^m w_{ij} x_{ij}}{\sum_{i=1}^m w_{ij} (\sum_{j=1}^n x_{ij})} \quad (3)$$

分母代表用水主体 j 的权重选择所得到的所有用水主体的总分, 分子表示用水主体 j 使用相同权重选择的自我评价。因此, 式(3)展示了用水主体 j 在权重 w_{ij} 下的相对重要性。假设该加权分数是可转移的, 用水主体 j 希望通过选择最优的权重来最大化这个比率, 从而产生以下线性规划方程:

$$\begin{cases} \max v_j \\ \text{s. t. } w_{ij} \geq 0 \quad (\forall i) \end{cases} \quad (4)$$

使用 Charnes-Cooper 变换方案, 式(4) 可以使用如下线性规划表示:

$$\begin{cases} v_j = \max \sum_{i=1}^m w_{ij} x_{ij} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m w_{ij} = 1 \\ w_{ij} \geq 0 \quad (\forall i) \end{cases} \quad (5)$$

经过以上变化, 问题就转化为在 $\sum_{i=1}^m w_{ij} = 1$ 的约束条件下, 最大化 v_j , 显然对于每一个用水主体 k 来说, 最优解是令 $w_{ij} = 1$, 但根据 Nakabayashi 等^[17] 的证明, 若每个用水主体都坚持自己的利己主义价值观 $w_{ij} = 1$, 则得到的利益分配的总和会超过 1, 这种情景称之为“利己主义困境”。为了获得公平可行的分配方案, 解决上述问题, 引入 DEA 合作博弈假设: 在水资源分配中, 所有用水主体同意相互协商, 不中断此博弈, 以获得合理公平的水资源分配。

假设所有区域都是合作的, 令联盟 S 是区域集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 的一个不确定子集, 且 $S \subseteq N$ 。令准则 i 的联盟 S 的权重表示为 $w_{is} (i = 1, 2, \dots, m)$, 则联盟 S 的特征函数可以表示为:

$$\begin{cases} v(S) = \max \sum_{i=1}^m w_{is} (\sum_{j \in S} x_{ij}) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m w_{is} = 1 \\ w_{is} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (6)$$

1.4 模型评价指标体系、生态优先与奖惩机制

模型的生态优先目标由评价指标体系中的相应指标及其权重体现。在模型的指标体系中构建了生态保护的相关指标, 通过指标权重的设置反映生态保护的优先程度。指标权重的设置同时反映了奖惩机制, 即对水资源利用过程中的合意产出(正向指标)进行激励, 对非合意产出(负向指标)进行惩罚。社会公平的相关指标不进行奖惩。适当的奖惩机制一方面能够将有限的水资源进行合理的配置, 另一方面可以激励地区经济发展, 并引导地区贯彻落实生态优先、绿色发展的理念, 鼓励用水主体提高水资源利用效率, 节水优先保护流域生态环境, 实现生态优先下的流域水资源合理配置。

在生态优先的视角下, 统筹考虑实现水资源、社会经济、生态环境的多目标, 参考水资源配置指标体系构建文献^[22-23], 并结合专家访谈的方法, 建立以经济发展、社会公平和生态保护为目标的多属性奖惩指标体系, 见表 1。

为了便于比较, 本文设置 4 种情景, 其中经济发展优先情景意味着经济目标最有价值, 在计算时将被赋予更高权重, 社会公平和生态优先情景同理, 而同等重要情景指 3 个目标具有相同的重要性。4 种情景反映了不同的水资源配置政策导向原则。模型依据不同情景政策导向设置的权重体现奖惩的程度。本文运用 G1 法^[24] 确定不同情景的权重, 目标集为 $\{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{经济发展, 社会公平, 生态保护}\}$, 不同情景由专家给出的重要性序关系决定, 设专家关于评价指标 x_{k-1} 和 x_k 的重要程度之比 w_{k-1}/w_k 的理性判断为 $w_{k-1}/w_k = r_k$, r_k 的赋值可参考表 2。

利用 G1 法, 经过计算可得到不同情景下的目标权重, 其中经济发展优先情景表示经济发展目标优先于其他两种目标, 在建立序关系之后得到的 3 种目标的指标权重分别为 0.411 7、0.294 1 和 0.294 1, 同理可得其余情景具体目标权重如表 3 所

表 1 水资源配置多属性指标体系

目标	名称	单位	符号	类型	含义
经济发展	国内生产总值	亿元	C_1	正向	指标值越大,表示一个地区经济发展水平越高
	工业生产总产值	亿元	C_2	正向	衡量了工业生产对国民经济增长的贡献,该指标值越大表明该地区工业产业发展水平越高
	人均 GDP	元/a	C_3	正向	反映区域内人均生产总值,越高的地区应增加水资源分配量
社会公平	区域人口	万人	C_4	正向	反映区域总人口数,越密集的地区将会被分配到更多水资源
	全年用水总量	亿 m^3	C_5	正向	体现了—个区域生产生活的总需水量,应考虑将更多水资源分配给用水总量更大的地区
	人均生活用水量	m^3	C_6	负向	反映人均生活用水现状,作为节水奖励,人均用的少的可以适当多增加水资源分配量
	农田灌溉亩均用水量	m^3	C_7	正向	指标值越大表示需要分配到更多的水资源以保证粮食生产
生态保护	绿化覆盖面积	hm^2	C_8	正向	反映生态环境现状,绿化覆盖面积越大表示生态环境越好,应分配更多水资源
	污水处理指数		C_9	正向	为鼓励保护生态应将更多水资源分配给污水处理指数较多的区域
	工业企业重复用水量	万 m^3	C_{10}	负向	反映节约用水的水平,重复利用水资源以减少工业水向环境中排放,指标值越大表示工业对水资源重复利用量越高,对水资源利用越充分,工业重复用水量较高的地区将被分配较少的水资源

表 2 r_k 赋值参考

r_k	说明
1.0	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 具有同样重要性
1.2	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 稍微重要
1.4	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 明显重要
1.6	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 强烈重要
1.8	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 极端重要

示,其中 w_{Eco} 、 w_{Soc} 、 w_{Env} 分别表示经济发展优先、社会公平优先和生态保护优先情景下的权重。

表 3 不同情景下指标权重的确定

目标情景	序关系	w		
		w_{Eco}	w_{Soc}	w_{Env}
经济发展优先情景	$U_1 > U_2 > U_3$	0.4117	0.2941	0.2941
社会公平优先情景	$U_2 > U_1 > U_3$	0.2941	0.4117	0.2941
生态保护优先情景	$U_3 > U_2 > U_1$	0.2941	0.2941	0.4117
3 种目标同等重要情景	$U_1 = U_2 = U_3$	0.3333	0.3333	0.3333

2 实例验证

2.1 研究区概况及矛盾冲突

南四湖地处南水北调东线苏鲁省际交水地段,是我国南水北调东线工程重要的调蓄湖泊,呈西北、东南方向展布,由南阳、独山、昭阳、微山四个湖泊相连而成,是我国北方最大的淡水湖,具有蓄水、防洪、排涝、引水灌溉、城市供水、水产养殖、通航及旅游等多种功能。南四湖流域内多年平均降水量约 700 mm,降雨年际间变化较大,年最大降水量 1 211 mm,最小年降水量 554.5 mm,丰枯相差悬殊。

位于两省之间的南四湖,历来就是苏鲁争水之地,从 1949 年以来苏鲁两省因排水、用水等纠纷引

起的群众械斗达 400 余起。1960 年山东省在昭阳湖腰建成的二级坝枢纽工程将全湖分为上、下两级,二级坝工程使山东省具备了在枯水期超标抽取南四湖下级湖水的条件,矛盾冲突进一步加剧,为解决日益激烈的南四湖流域苏鲁两省之间的冲突,国家水利部于 1980 年出台了《关于处理苏鲁南四湖地区边界水利问题的报告》,报告规定南四湖用水下级湖以江苏省为主,山东可引用 1.5 亿 m^3 ,然而实际上在干旱年份山东省不向两省共有的下级湖放水,21 世纪以来南四湖下级湖多次出现低于生态水位的现象,严重威胁了湖泊的水生态环境,并影响湖泊周边农作物的生产。

2.2 评价指标数据及标准化处理

研究数据来源于 2011—2021 年《济宁统计年鉴》《徐州统计年鉴》《济宁市水资源公报》和《徐州市水资源公报》。为了避免数据波动对模型的影响,故采用 2011—2021 年济宁、徐州两市数据的平均值。在计算前,对指标进行了标准化处理,并将负向指标转化为正向指标数据,标准化后的数据见表 4。

表 4 济宁市和徐州市标准化后的指标数据

指标	济宁	徐州
C_1	0.4619	0.5381
C_2	0.4293	0.5707
C_3	0.3602	0.6398
C_4	0.4970	0.5030
C_5	0.3644	0.6356
C_6	0.7237	0.2763
C_7	0.3665	0.6335
C_8	0.3428	0.6572
C_9	0.5267	0.4733
C_{10}	0.3387	0.6613

3.3 生态优先下基于奖惩机制的南四湖下级湖水资源分配结果

3.3.1 指标权重

通过 G1 法确定目标层权重后,各个指标的权重可由线性规划(6)求解,可得到不同情景下的指标权重 $w_i (i = 1, 2, \dots, 10)$,该权重为模型的分配依据,具体权重如表 5 所示。

3.3.2 无奖惩机制的分配方案

本文首先借鉴杨志峰等^[25]及付湘等^[26]的研究,基于合作博弈理论采用纳什法进行无奖惩机制的水量分配,为了使水资源配置方案更加科学、实际,本文分情况讨论了用水主体济宁市和徐州市在不同年型的水资源配置方案,使得水资源配置结果在时间和空间上都具有可比性。根据水利部淮河委员会对于南四湖的长系列分析计算,南四湖汛期占 84.8%,以此计算汛期和非汛期的可用水量。计算结果如表 6 所示,使用合作博弈的方法,两省水量分配较为均衡。

3.3.3 生态优先下带有奖惩机制的分配方案

水资源合理配置不仅意味着公平分配,更要注重效率以及经济社会和生态环境的协调、相容。因此,本文提出以经济利益最大化、社会公平最大化、生态优先和同等重要的 4 种分配方案:①经济发展优先的分配方案。水资源合理配置是区域经济相容、资源共享的重要一步,该方案以经济发展为目标

导向,考虑了用水主体的国内生产总值、工业生产总值和人均 GDP 的情况,奖励经济水平较高的地区优先满足水资源需求,以保证地区的经济增长,实现经济效益最大化,两地分配水量如表 7 所示。②社会公平优先的分配方案。以社会公平最大为目标导向,尊重地区的历史现状,考虑区域人口、人均生活用水量、全年用水总量和农田灌溉亩均用水量指标,以保证地区人民生产、生活用水的公平性,具体分配水量见表 7。③生态优先的分配方案。水资源合理配置更重要的是让社会发展与生态环境协调共融,为了贯彻区域生态优先、绿色发展的理念,在以生态优先为导向的分配方案中考虑绿化覆盖面积、污水处理指数和工业企业重复用水量,鼓励地区扩大绿化覆盖,促进水资源集约高效利用和节水增效,分配水量见表 7。④3 种目标同等重要的分配方案。水资源的分配是各种复杂因素之间的权衡,本方案给予 3 个目标同等权重,认为地区的经济发展、社会公平和生态保护同等重要,分配水量如表 7 所示。

3.3.4 水资源配置方案对比

a. 生态优先方案对比。对比生态优先方案与经济发展优先方案,以丰水年为例,在经济发展优先方案中,徐州市分水量为 35 105.43 万 m^3 ,而降低经济发展权重、提升生态优先权重后,徐州市分水量随之提高至 35 203.01 万 m^3 ,比经济发展优先的方案

表 5 4 种情境下的指标权重

目标情景	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
经济发展优先情景	0.1393	0.1355	0.1370	0.0701	0.0732	0.0775	0.0733	0.1028	0.0967	0.0946
社会公平优先情景	0.0992	0.0983	0.0966	0.1006	0.1027	0.1043	0.1042	0.1009	0.0978	0.0955
生态优先情景	0.1000	0.0969	0.0972	0.0681	0.0732	0.0795	0.0733	0.1501	0.1333	0.1282
同等重要情景	0.1124	0.1101	0.1109	0.0791	0.0831	0.0879	0.0832	0.1163	0.1096	0.1075

表 6 无奖惩机制下的水资源配置方案

单位:万 m^3

济宁市				徐州市			
丰水年		平水年		丰水年		平水年	
汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
29 744.94	5 331.64	22 425.20	4 019.61	29 869.46	5 353.96	22 518.80	4 036.39

表 7 奖惩机制下的水资源配置方案

单位:万 m^3

配置方案	济宁市				徐州市			
	丰水年		平水年		丰水年		平水年	
	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
经济发展优先方案	24 678.57	4 423.52	18 552.68	3 325.48	35 105.43	6 292.48	2 6391.32	4 730.52
社会公平优先方案	24 241.26	4 345.13	18 223.93	3 266.55	35 548.71	6 371.94	26 724.57	4 790.25
生态优先方案	24 569.03	4 403.88	18 470.33	3 310.72	35 203.01	6 309.97	26 464.68	4 743.67
同等重要方案	24 501.92	4 391.85	18 419.88	3 301.68	35 288.06	6 325.22	26 528.61	4 755.13

多分配了 95.78 万 m^3 。这是由于:一方面在生态优先的水资源配置方案中,生态保护的指标被赋予了更高权重,另一方面,本文选取用于衡量生态优先表现的 3 个指标中,徐州市绿化覆盖面积、工业企业重复用水量的表现均优于济宁市,徐州市 2011—2020 年平均绿化覆盖面积为 16 253.2 hm^2 ,为济宁市的 1.72 倍,污水处理指数高于济宁市(图 2)。两种因素共同决定了对于将生态优先、绿色发展理念落实更好的徐州市将会分配较多的水资源。因此,考虑生态优先的水资源配置方案有助于激励地方政府将水生态保护放在更加优先的位置。

方案,将有无奖惩机制的水资源配置结果进行比较。在无奖惩机制的配置中,济宁市与徐州市的分水量较为均衡,以丰水年的汛期为例,两市分水量分别为 29 744.94 万 m^3 和 29 869.46 万 m^3 ,徐州市分配水量比济宁市多 124.52 万 m^3 。而在奖惩机制的作用下,考虑经济发展优先时,丰水年汛期徐州市分配水量比济宁市高 10 426.87 万 m^3 ,这是由于徐州市的经济发展水平高于济宁市,徐州市国内生产总值、工业生产总值及人均 GDP 指标均较高,以两地 2011 至 2020 年 10 年的平均国内生产总值为例,济宁市为 4 037.30 亿元,而徐州则达 5 561.55 亿元。在奖惩机制的作用下,经济水平较高的地区将被奖励优先分配水资源,以鼓励地区高效发展经济。

将两种分配方案对比可知,在无奖惩机制的配置方案中,济宁市与徐州市的分配水量有一定差异,但总体来说较为均衡,而在奖惩机制的作用下,两市分配水量差距较大,徐州市的整体分水量大于济宁市,原因在于徐州市的经济发展水平和生态保护情况优于济宁市。本文提出的带有奖惩机制的水资源配置模型在考虑分配时,会根据多属性评价指标识别每个用水主体的表现,并依据不同目标奖励表现较好的地区,进而引导地区顺应中央政府政策要求目标,在高效发展经济的同时保护流域生态环境,从水资源系统的总体效率和流域可持续发展的角度来看更为有利。该配置方案不仅符合水利部出台的下级湖用水以江苏为主的规定,为南四湖的水资源冲突问题提出了协调方案,还有利于下级湖的水生态保护和经济社会发展,符合生态优先、节水优先的理念。模型既保证了在生态优先原则下对南四湖省际区域之间水资源进行协调分配,从而有效消除了流域内跨界用水矛盾与冲突,又有利于激励区域地方政府提高水资源利用效率、节约用水和保护生态环境,优化南四湖流域水资源配置的社会经济环境综合效益。

4 结论与建议

针对流域水资源日益严峻的冲突治理难题,本文在生态优先视角下,融合多属性指标、DEA 模型和合作博弈理论,构建基于奖惩机制的流域水资源多主体合作配置模型,以南四湖为例进行水资源配置方案研究,提出以经济利益、社会公平和生态优先最大化为导向的水资源配置方案。在不忽视经济发展和社会公平的同时,通过奖惩机制激励地区合理配置水资源,引导流域地方政府走“节约用水,经济转型,生态保护”的高质量发展之路。研究结果表明:本文提出的模型落实了“生态优先、绿色发展”

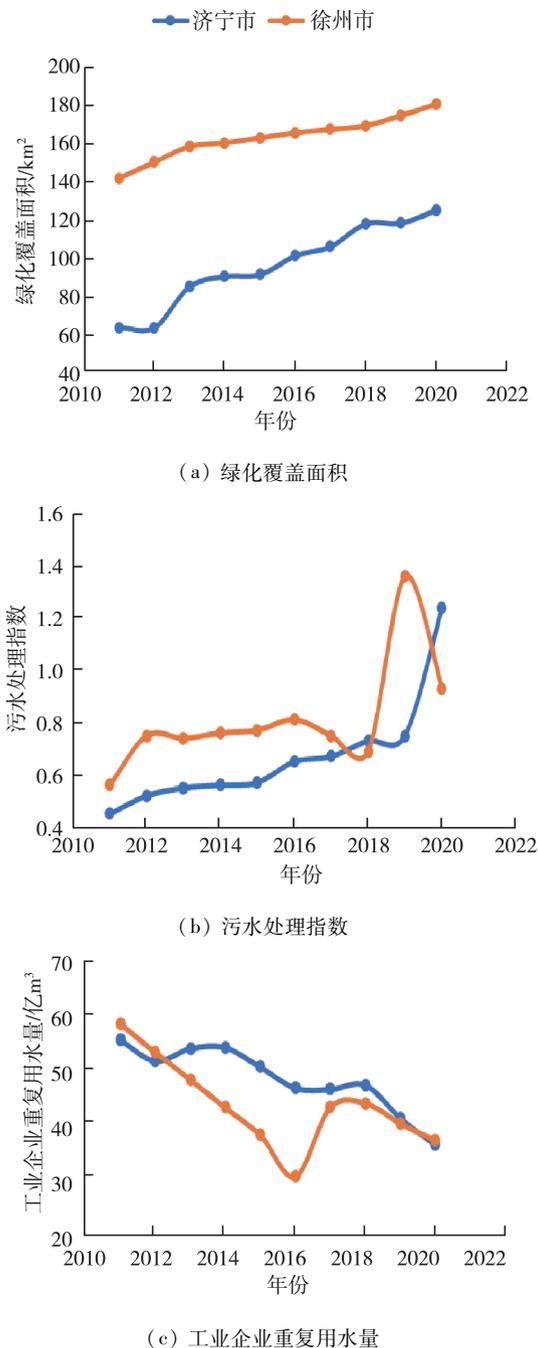


图 2 济宁市、徐州市 2011—2020 年生态优先指标对比

b. 奖惩机制方案对比。为了更好地比较评价带有奖惩机制的水资源配置模型并得出科学的配置

的理念,辅以奖惩的配置方案在考虑分配时,奖励生态保护表现较好的地区更多水量,能引导地方政府落实生态优先战略、实施节水行为,在兼顾经济发展和社会公平的同时,激励地方政府保护环境,有利于提升流域的可持续发展。基于此,本文提出以下政策建议:

a. 针对水资源紧缺和地区生态环境保护现状严峻的两大问题,水资源矛盾冲突的解决不仅有赖于用水主体间的协作,更有赖于以行政和法律为主的奖惩机制及其具体落实,而由于央地政府的信息不对称,且生态环境的改善具有长期性,其难以量化地方政府官员的政绩,中央政府必须制定合理的奖惩机制,引导地方政府行为,才能促进地方水资源集约高效利用和流域生态环境的保护。

b. 在协调水资源冲突问题中,地方政府在应落实新时期“生态优先、绿色发展”行动指南的同时加强地区间的合作共赢,并在奖惩机制的约束下,顺应发展中央政府政策要求下的用水行为导向目标,提高政策奖励指标值以便在配置中获得更多的水量,满足地区经济社会和生态的用水需求,既要考虑分水公平,更要注重经济发展与生态环境的协调共融,实现经济和生态二者的同步跃升,推进流域高质量发展。

参考文献:

[1] 郭利颖,田富强,魏靖,等. 跨境淡水冲突与合作研究综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 589-600.

[2] 魏圣香,王慧. 长江保护立法中的利益冲突及其协调[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2019, 18(6): 11-22.

[3] 华士乾. 水资源系统分析指南[M]. 北京:水利电力出版社, 1988.

[4] 王浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1-6.

[5] 王浩,游进军. 中国水资源配置30年[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265-271.

[6] 吴丹,王亚华. 双控行动下流域初始水权分配的多层递阶决策模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 215-224.

[7] DENG G, LI L, SONG Y. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: based on SBM-DEA model[J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 12-8.

[8] 张凯,陆海曙,陆玉梅. 三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1778-1793.

[9] 雷西洋,丁彦,李姚矿,等. 一种考虑子公司竞合关系的跨国公司固定成本分摊方法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(7): 1714-1720.

[10] SUN J, FU Y, JI X, et al. Allocation of emission permits using DEA-game-theoretic model [J]. Operational Research, 2017, 17(3): 867-884.

[11] 张凯,李万明. 基于破产博弈理论的流域水资源优化配置分析[J]. 统计与信息论坛, 2018, 33(1): 99-105.

[12] DEGEFU D M, HE W, YUAN L, et al. Water allocation in transboundary river basins under water scarcity: a cooperative bargaining approach [J]. Water resources management, 2016, 30(12): 4451-4466.

[13] 李湘姣,王先甲. 征税条件下流域水资源利用冲突的博弈分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(9): 24-7.

[14] 孙冬营,王慧敏,于晶. 基于模糊联盟合作博弈的流域水资源优化配置研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(12): 153-158.

[15] MADANI K. Game theory and water resources [J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3-4): 225-238.

[16] MEHRPARVAR M, AHMADI A, SAFAVI H R. Resolving water allocation conflicts using WEAP simulation model and non-cooperative game theory [J]. Simulation, 2020, 96(1): 17-30.

[17] NAKABAYASHI K, TONE K. Egoist's dilemma: a DEA game [J]. Omega, 2006, 34(2): 135-148.

[18] 王金凤,孟徐飞,王铮,等. 输电固定成本分摊的 AR-DEA 合作博弈核仁解方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(3): 44-48.

[19] ANDREONI J, HARBAUGH W, VESTERLUND L. The carrot or the stick: rewards, punishments, and cooperation [J]. American Economic Review, 2003, 93(3): 893-902.

[20] 黄康,李怀恩,成波,等. 基于 Tennant 方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 103-110.

[21] 初钊鹏,卞晨,刘昌新,等. 雾霾污染、规制治理与公众参与的演化仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 101-111.

[22] 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(2): 216-219.

[23] 李芳,吴凤平,陈柳鑫,等. 基于加权破产博弈模型的跨境流域水资源分配研究[J]. 地理科学, 2021, 41(4): 728-736.

[24] 柴琪宸,郭亚军,宫诚举,等. 中国省域生态文明建设协调发展程度的综合评价[J]. 中国管理科学, 2017, 25(7): 184-190.

[25] 杨志峰,曾勇. 跨边界区域水资源冲突与协调模型与应用(I)模型体系[J]. 环境科学学报, 2004(1): 71-76.

[26] 付湘,陆帆,胡铁松. 利益相关者的水资源配置博弈[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 38-43.

(收稿日期: 2022-06-07 编辑:陈玉国)