

引用格式: 褚钰. 考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 117-124. [Chu Y. Optimal water resources allocation of the river basin considering the water body satisfaction degree[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 117-124.] DOI: 10.18402/resci.2018.01.11

考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置研究

褚钰^{1,2}

(1. 河南工程学院, 郑州 451191; 2. 河海大学, 南京 210098)

摘要: 目前, 中国的流域水资源配置主要基于集体理性假设, 从水资源单一决策主体的角度出发, 追求流域利益最大化, 由于未能充分考虑各用水主体的协商意愿和利益诉求, 容易使得用水主体对配水方案的满意程度不高, 方案执行阻力较大。为此, 本文定义了用水主体满意度, 来衡量用水主体对水资源配置方案的满意程度, 在此基础上, 提出了用水主体满意度原则, 并将其数学量化为最低满意度函数和差异满意度函数, 为用水主体参与水资源配置决策提供协商渠道。最后, 结合水资源分配基本原则和用水主体满意度原则, 构建了流域水资源优化配置模型, 并进行了算例验证。结果表明, ①所建模型符合流域水资源配置的公平性原则; ②各区域对于分水方案的满意度水平与自身决策权重存在正相关匹配关系; ③最低满意度设置较低时, 流域水资源管理者更侧重于分水活动的高效性; 反之, 更侧重于分水活动的公平性。

关键词: 流域水资源; 优化配置; 用水主体; 满意度函数; 清漳河流域

DOI: 10.18402/resci.2018.01.11

1 引言

随着人口与经济的增长, 水资源的需求量不断增加, 加之水环境不断恶化, 水资源短缺已成为全球性问题, 对水资源进行合理优化配置显得尤为重要。目前, 关于水资源配置的研究方法主要有层次分析法^[1,2]、多目标优化法^[3,4]、模糊评价法^[5,6]、不确定性分析法^[7-11]。这些方法主要基于集体理性的假设, 遵循基本用水保障原则、尊重历史与现状原则、公平性及高效性等原则, 从水资源配置单一决策主体——流域管理机构的角度出发, 寻求整体最优的配置方案。在水资源充足情况下, 这一水资源配置方式能够得到用水主体的认可和执行。但随着社会的发展, 用水主体参与分水决策过程、表达主观意愿、维护自身利益的意愿越来越强烈。在水资源日益紧缺的现实情况下, 这一水资源配置方式为用水主体提供的利益表达渠道十分有限, 使得基于集体理性得到的水量配置方案无法满足个体理性的要

求, 用水主体对配置方案的满意度不高, 存在从个体理性出发、私自采取行动以获得所需水资源的现象, 水资源冲突不可避免。因此, 流域水资源配置不仅仅要从集体理性出发考虑流域整体利益, 同时也必须承认个体理性的存在, 增加用水主体参与水资源配置的渠道。

国内外已有研究将民主协商思想引入水资源配置领域^[12,13]。国内, 王贵作等指出协商是流域管理与行政区管理相结合的水资源管理体制的内在需求, 是解决流域水资源问题的重要方法^[14]; 陈刚等在考虑流域内各区域用水紧张程度差异性的基础上, 构建了跨界河流量分配的协商模型^[15]; 贺骥认为应确立以联席会议为协商形式的两级协商体制^[16]; 胡晓寒等从水资源使用权初始分配协商的要素分析出发, 构建了以综合满意度最大为目标的协商模型^[17]。这些研究为构建流域水资源配置的民主协商机制提供了基本思路和制度框架, 但在模型的构建

收稿日期: 2017-02-20 修订日期: 2017-09-22

基金项目: 河南工程学院博士基金项目(D2016035); 国家社会科学基金项目(14BGL097); 河南省政府决策研究招标课题(2017B389); 河南省社会科学规划项目(2017BJJ023)。

作者简介: 褚钰, 女, 河南荥阳人, 博士, 讲师, 主要研究领域为水资源与水环境管理。E-mail: cychuyu@163.com

过程中,设定的可协商阈值是事先给定的可行性方案集,各协商主体只能对给定方案进行评价,在水资源配置中没有体现协商主体的意愿。因此,本文在基本用水保障原则、尊重历史与现状原则、公平性原则、高效性原则基础上,将协商思想引入流域水资源配置:首先,定义用水主体满意度,表征用水主体对于分水方案的满意程度,提供用水主体参与水资源配置决策的渠道;其次,提出用水主体满意度原则,表征用水主体意愿表达在水资源配置中的作用;再次,构建用水主体满意度约束函数,近似模拟用水主体在水资源配置过程中的协商行为;最后构建考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置模型,并以中国清漳河流域为例进行实例研究。

2 用水主体满意度的定义及原则

2.1 用水主体满意度的定义

目前,中国的流域水资源配置多由流域管理者制定配置方案,流域内各区域主体依照配置方案进行取水,方案的执行情况在制定过程中未得到充分考虑。本文将方案的可执行性解释为:当用水主体对方案满意程度较高时,对方案的执行力度大;当对方案满意程度较低时,对方案的执行力度小。用水主体对配置方案的满意程度可以通过用水主体满意度来刻画,它反映的是有限理性的用水主体从自身利益角度考虑,对水资源配置方案的主观评价。在水资源配置过程中考虑用水主体的满意度,提供用水主体的利益诉求渠道,可以提高水资源配置方案的可执行性。

用水主体对分水方案的满意程度可通过对比分配水量和需水量,或是对比实际用水效益与期望用水效益来获取。当对比分配水量和需水量时,用水主体的满意度可量化为 S_{kt} :

$$S_{kt} = \begin{cases} 0 & R_{kt} < D_{\min kt} \\ \frac{R_{kt} - D_{\min kt}}{D_{\max kt} - D_{\min kt}} & D_{\min kt} < R_{kt} < D_{\max kt} \\ 1 & R_{kt} \geq D_{\max kt} \end{cases} \quad (1)$$

式中 S_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的用水主体满意度, $k=1, 2, \dots, K$, K 为流域内行政区域的数量; R_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的分配水量; $D_{\min kt}$ 和 $D_{\max kt}$ 分别为 t 时刻行政区域 A_k 的最低和最高需水量。

当通过对比实际用水效益和期望用水效益计

算用水主体满意度时,用 t 时刻行政区域 A_k 的用水效益、最低用水效益和最高用水效益替换式(1)中 t 时刻行政区域 A_k 的分配水量、最低需水量、最高需水量即可。

用水主体满意度是用水主体在分水协商中对配置方案的主观感受和判断,公式(1)中的最小和最大值主要是指用水主体对于需水量的最低和最高期望值。然而,由于人的“利己”属性,在量化用水主体满意度时,如果仅以用水主体上报的数据信息来进行计算,往往会造成用水主体满意度失真,继而引起分水方案出现较大偏差。为平衡这种偏差,减少用水主体片面性给水资源配置带来的不利影响,引入流域水资源管理者的客观判断这一因素,对 $D_{\min kt}$, $D_{\max kt}$ 参数修订如下:

$$\begin{aligned} D_{\min kt} &= \alpha \cdot D_{\min kt}^u + (1 - \alpha) \cdot D_{\min kt}^l \\ D_{\max kt} &= \alpha \cdot D_{\max kt}^u + (1 - \alpha) \cdot D_{\max kt}^l \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $D_{\min kt}^u$ 和 $D_{\max kt}^u$ 分别为流域水资源管理者所认为的区域 A_k 的最小和最大需水量; $D_{\min kt}^l$ 和 $D_{\max kt}^l$ 分别为区域 A_k 用水主体自认为的最小和最大需水量; α 为流域水资源管理者的干预参数,是宏观调控的一种体现。若用水主体大局意识、协商合作主动性较强,应尽量减少配置主体的干预力度,将 α 取值调小;相反,若用水主体个人主义较强,倾向于过分夸大用水需求时,可以适当加强分水主体的干预力度,将 α 取值调大,以避免其他用水主体利益受损。

2.2 用水主体满意度原则

用水主体对水资源配置方案的执行程度受两方面因素的影响:一方面从自身角度出发,考虑个体利益诉求是否得到一定程度的保障和解决,即用水主体满意度需高于最低满意度;二是在主体间横向比较时,各用水主体的满意度应基本做到协调均衡,即各用水主体能感受到分水方案对于每个主体都是公平的。在数学上,可以将用水主体满意度原则抽象量化为最低满意度函数和差异满意度函数。

最低满意度函数:各主体满意度应大于最低满意度阈值,其数学表示为:

$$S_{kt} \geq S_0 \quad (3)$$

式中 S_0 为 t 时刻流域管理机构规定的各行政区域需实现的最低满意度。

2018年1月

差异满意度函数:各用水主体满意度的协调性偏差应控制在一个较小范围内。当仅考虑用水主体间的平等性时,其数学表示为:

$$|S_{kt} - S_{jt}| \leq \varepsilon \quad (4)$$

式中 S_{jt} 为 t 时刻行政区域 A_j 的用水主体满意度,且 $j \neq k$; ε 为满意度平衡误差,取近似于 0 的极小正数。

然而,公式(4)过于强调平等性,忽视了流域水资源配置中各用水主体的差异性和高效性。从资源配置的角度看,满意度平衡不是一味要求各主体对分水方案的满意度绝对一致,而应基于流域整体效益考虑,允许各区域主体的满意度存在一定差异性,且各区域主体间的差异满意度应与各自在水资源配置中的决策权重相匹配。基于此,将公式(4)修改为:

$$\left| \frac{S_{kt} - S_{t0}}{\omega_{kt}} - \frac{S_{jt} - S_{t0}}{\omega_{jt}} \right| \leq \delta \quad (5)$$

式中 ω_{kt} 、 ω_{jt} 分别为行政区域 A_k 、 A_j 的决策权重; δ 为误差系数,取近似于 0 的极小正数。 ω_{kt} 、 ω_{jt} 是构造差异满意度函数的关键,取值的确定很大程度上受到流域水资源分配原则的客观影响。当分配原则有利于某行政区域时,其决策权重相对较高;反之,其决策权重相对较低。考虑到公平性和高效性原则主观程度较高,而尊重历史和现状原则更强调客观事实,易于被用水主体接受和认可,依据水源地优先、占用优先和人口优先原则来确定各区域的决策权重更为合理。具体计算方法如下:

(1)水源地优先原则要求按照各区域产水量进行分配,产水量越高,决策权重越高。由此形成的决策权重可表示为:

$$\gamma_{Ckt} = \frac{C_{kt}}{\sum_{k=1}^K C_{kt}} \quad (6)$$

式中 γ_{Ckt} 为行政区域 A_k 在水源地优先项上的决策权重; C_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的产水量, K 为流域内行政区域数量。

(2)占用优先原则要求按照各区现状用水量进行分配,现状用水量越高,决策权重越高。由此形成的决策权重可表示为:

$$\gamma_{Okt} = \frac{O_{kt}}{\sum_{k=1}^K O_{kt}} \quad (7)$$

式中 γ_{Okt} 称为行政区域 A_k 在占用优先项上的决策权重; O_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的现状用水量。

(3)人口优先原则要求按照各区域人口比例进行分配,区域人口越多,决策权重越高。由此形成的决策权重可表示为:

$$\gamma_{Pkt} = \frac{P_{kt}}{\sum_{k=1}^K P_{kt}} \quad (8)$$

式中 γ_{Pkt} 称为行政区域 A_k 在人口优先项上的决策权重; P_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的人口总量,由于人口具有流动性,这里主要指现居住人口总量。

区域 A_k 的决策权重 ω_{kt} 应该是上述三类决策权重的加权平均,其数学表示为:

$$\omega_{kt} = \theta_C \cdot \gamma_{Ckt} + \theta_O \cdot \gamma_{Okt} + \theta_P \cdot \gamma_{Pkt} \quad (9)$$

式中 θ_C 、 θ_O 和 θ_P 分别为水源地优先、占用优先和人口优先原则在流域水资源配置中的受重视程度,需根据当地水资源分配实情决定,且 θ_C 、 θ_O 和 θ_P 需满足:

$$\theta_C + \theta_O + \theta_P = 1 \quad (10)$$

3 流域水资源优化配置模型

国内外研究已提出了基本用水保障原则、尊重历史与现状原则、公平性及高效性等水资源分配基本原则,本文结合水资源分配基本原则和用水主体满意度原则,建立考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置模型。

3.1 基本思路

(1)流域水资源分配原则有基本用水保障原则、尊重历史与现状原则、用水主体满意度原则、公平性原则和高效性原则。其中基本用水保障原则、用水主体满意度原则作为模型的约束条件,尊重历史与现状原则在公式(5)计算行政区域 A_k 、 A_j 的决策权重时体现。

(2)在流域水资源分配时,根据基本用水保障原则,基本用水要全额优先满足,因此,首先将基本用水量从可用水资源总量中减去,对剩余水量在区域间进行分配。

(3)根据公平性原则和高效性原则,流域水资源配置的公平性和效益性越高越好,因此,所建模型以高效用水和公平用水为目标函数。

3.2 目标函数

(1)高效用水目标。高效用水主要指的是经济

效益,流域管理机构进行水资源配置时,追求经济效益最大化,数学表示为:

$$\begin{aligned}\max B_t &= \max \sum_{k=1}^K B_{kt} \\ &= \max \sum_{k=1}^K b_{kt} \cdot R_{kt}\end{aligned}\quad (11)$$

式中 B_t 为 t 时刻整个流域的经济效益,为流域内各区域经济效益 B_{kt} 之和; b_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的单方水 GDP 产值。

(2) 公平用水目标。公平用水要求水量分配要相对均匀,通常用缺水率来衡量。流域管理机构进行水资源配置时,追求整个流域缺水率最小,数学表示为:

$$\begin{aligned}\min F_t &= \min [\max (F_{kt})] \\ &= \min \left[\max \left(\frac{D_{kt} - R_{kt}}{D_{kt}} \right) \right]\end{aligned}\quad (12)$$

式中 D_{kt} 为 t 时刻行政区域 A_k 的需水量; $F_{kt} = D_{kt} - R_{kt} / D_{kt}$ 为 t 时刻行政区域 A_k 的缺水率; F_t 为 t 时刻整个流域的缺水率,用各行政区域的最大缺水率来表示。

(3) 综合用水目标。将上述两个目标函数进行加权平均,整合为单目标函数。

首先,对经济效益函数 B_t 进行标准化处理:

$$SB_t = \frac{\sum_{k=1}^K b_{kt} \cdot R_{kt}}{\max (b_{kt}) \cdot \sum_{k=1}^K R_{kt}} \quad (13)$$

然后,将高效用水目标函数转变为取小型函数:

$$\min -SB_t = \min - \frac{\sum_{k=1}^K b_{kt} \cdot R_{kt}}{\max (b_{kt}) \cdot \sum_{k=1}^K R_{kt}} \quad (14)$$

最终可建立如下单目标函数:

$$\begin{aligned}\min & [\beta \cdot F_t - (1 - \beta) \cdot SB_t] \\ &= \min \left[\beta \cdot \max \left(\frac{D_{kt} - R_{kt}}{D_{kt}} \right) - (1 - \beta) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K b_{kt} \cdot R_{kt}}{\max (b_{kt}) \cdot \sum_{k=1}^K R_{kt}} \right]\end{aligned}\quad (15)$$

式中 β 为公平用水原则对应的权重, $\beta \in [0, 1]$, 其值可以根据分水主体对缺水率和经济效益两个指标的侧重程度来确定。

3.3 约束函数

3.3.1 基本约束

(1) 根据基本生活用水保障原则,基本生活用水分配量需满足:

$$\begin{aligned}RL_{kt} &= DL_{kt} \\ DL_{kt} &= \sum_{i=1}^3 DL_{kti} \\ DL_{kt1} &= d_{kpop1} \cdot pop_{k1} \\ DL_{kt2} &= d_{kpop2} \cdot pop_{k2} \\ DL_{kt3} &= d_{kliv} \cdot liv_k\end{aligned}\quad (16)$$

式中 RL_{kt} 和 DL_{kt} 分别为 t 时段行政区域 A_k 的基本生活用水分配量和需水量; DL_{kt1} 、 DL_{kt2} 和 DL_{kt3} 分别为行政区域 A_k 的城市、农村基本生活需水量和牲畜基本需水量; d_{kpop1} 、 d_{kpop2} 和 d_{kliv} 分别为行政区域 A_k 的城市、农村基本生活用水定额和牲畜用水定额; pop_{k1} 、 pop_{k2} 和 liv_k 分别为行政区域 A_k 的城市、农村人数和牲畜数量。

(2) 根据基本生态用水保障原则,基本生态用水分配量需满足:

$$RE_{kt} = DE_{kt} = \rho_{kt} \cdot \bar{F} \quad (17)$$

式中 RE_{kt} 和 DE_{kt} 分别为 t 时段行政区域 A_k 的基本生态用水分配量和需水量; ρ_{kt} 为 t 时段 A_k 区域河流基本生态环境需水量占河流年平均流量的百分比; \bar{F} 为河流多年平均流量。

(3) 根据粮食安全保障原则,粮食安全用水分配量需满足:

$$\begin{aligned}RC_{kt} &= \alpha_t \cdot DC_{kt} \\ DC_{kt} &= d_{ktcrop} \cdot crop_k\end{aligned}\quad (18)$$

式中 RC_{kt} 和 DC_{kt} 分别为 t 时段行政区域 A_k 的基本粮食保障用水分配量和需水量; α_t 为 t 时段全流域基本粮食用水保障程度; d_{ktcrop} 为 t 时段行政区域 A_k 单位粮食生产需水量; $crop_k$ 为行政区域 A_k 要求的基本粮食生产量。

综合上述分析, t 时段 A_k 区域的基本用水分配量 RA_{kt} 为:

$$\begin{aligned}RA_{kt} &= RL_{kt} + RE_{kt} + RC_{kt} \\ &= DL_{kt} + DE_{kt} + \alpha_t \cdot DC_{kt}\end{aligned}\quad (19)$$

由此得出,整个流域除基本用水之外的可分配水量 R_t 为:

2018年1月

$$R_t = RT_t - \sum_{k=1}^K RA_{kt}$$
$$= RT_t - RL_t - RE_t - RC_t$$

(20)

式中 RT_t 为 t 时刻整个流域的水资源供给总量; RL_t 、 RE_t 、 RC_t 分别为 t 时刻整个流域的基本生活、基本生态和粮食安全用水分配量。

3.3.2 物理约束

流域内各行政区域所分的水量之和应小于流域的可分配水量:

$$\sum_{k=1}^K R_{kt} \leq R_t$$

(21)

3.3.3 用水主体满意度约束

根据用水主体满意度原则,用水主体满意度约束包括最低满意度约束函数和差异满意度约束函数。数学表示如下:

$$S_{kt} \geq S_{t0}$$

(22)

$$\left| \frac{S_{kt} - S_{t0}}{\omega_{kt}} - \frac{S_{jt} - S_{t0}}{\omega_{jt}} \right| \leq \delta, k \neq j$$

(23)

3.4 流域水资源优化配置模型

综合目标函数和约束函数,构建流域水资源优化配置模型如下:

$$\min \left[\beta \cdot \max \left(\frac{D_{kt} - R_{kt}}{D_{kt}} \right) - (1 - \beta) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K b_{kt} \cdot R_{kt}}{\max(b_{kt}) \cdot \sum_{k=1}^K R_{kt}} \right]$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} RL_{kt} = DL_{kt} \\ RE_{kt} = DE_{kt} \\ RC_{kt} = \alpha_t \cdot DC_{kt} \\ \sum_{k=1}^K R_{kt} \leq RT_t - RL_t - RE_t - RC_t \\ S_{kt} \geq S_{t0} \\ \left| \frac{S_{kt} - S_{t0}}{\omega_{kt}} - \frac{S_{jt} - S_{t0}}{\omega_{jt}} \right| \leq \delta \\ 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases}$$

(24)

4 实例分析

清漳河流经山西的晋中市和长治市以及河北境内的邯郸市,根据《漳河上游水资源供需分析及调配研究》^{[18],1)},其流域供水、需水情况以及农业、工业用水情况如表1所示,基本生活用水情况如表2所示。本节使用所构建的模型对清漳河流域水资源进行分配,对不同最低满意度情况下清漳河流域水资源配置结果进行分析。

根据表1和表2,可计算出流域内山西和河北的基本生活需水量分别为0.1520和0.1400亿 m^3 ,优先满足基本生活用水后,流域可供分配的水资源总量为1.3779亿 m^3 ,山西和河北的需水量分别为0.3660亿 m^3 、1.0633亿 m^3 。

通过实地调研,本文设定水源地优先、占用优先和人口优先原则在清漳河流域水资源配置中的受重视程度分别为0.3、0.4和0.3。基于表1和2中的供水量、现状用水量和区域人口数据,依据公式(9),计算

表1 清漳河流域供需水以及农工业用水情况

Table 1 Water supply and agricultural and industrial water consumption in Qing River Basin

子区	行政 分区	总供水量 /亿 m^3	现状用水量 /亿 m^3	灌溉面积 /hm ²	农业用水定 额/(m ³ /亩)	渠系利 用系数	工业用水定额 /(m ³ /万元)	总需水量 /亿 m^3
清漳河山西境内	晋中市	0.423 2	0.431 1	78 000	300	0.49	71	0.444 4
	长治市	0.071 7	0.071 4	1 993	300	0.49	97	0.073 6
清漳河河北境内	邯郸市	1.175 0	1.167 4	12 333	548	0.49	43	1.203 3

表2 清漳河流域生活用水情况

Table 2 Domestic water consumption in Qing River Basin

行政分区	城镇人口 /万人	城镇用水指标 /(L/(人·天))	农村人口 /万人	农村用水指标 /(L/(人·天))	大牲畜 /万头	小牲畜 /万头	大牲畜用水 /(L/(头·日))	小牲畜用水 /(L/(头·日))
晋中市	8.58	125	22.44	62	7.54	67.90	35	15
长治市	0.54	62	7.34	40	0.87	4.09	35	15
邯郸市	10.12	142	35.46	45	5.26	41.23	35	15

1) 漳河上游水资源供需分析及调配研究. 河海大学, 2014年。

得出山西省和河北省的决策权重分别为 0.347、0.653。

取 $\beta=0.6$, $\varepsilon_1=0.1$, 根据本文构建的流域水资源优化配置模型, 得到不同最低满意度值下的配置结果, 见表 3。

表3 清漳河流域水资源优化配置结果

Table 3 The results of water allocation in Qing River Basin

最低满意度 S_0	子区	分配水量 / 亿 m^3	满意度 S_k	缺水率 / %	流域经济效益 / 亿元
0.2	山西	0.314 6	0.719	14.0	283.613 3
	河北	1.063 3	1.000	0	
0.4	山西	0.323 6	0.768	11.6	282.542 3
	河北	1.054 3	0.983	0.9	
0.6	山西	0.333 9	0.825	8.8	281.316 6
	河北	1.044 0	0.964	1.8	
0.8	山西	0.343 6	0.878	6.1	280.162 3
	河北	1.034 3	0.945	2.7	

分析表3的数据, 可以得出:

(1) 在最低满意度 S_0 一定情况下, 山西与河北的满意度 S_k 均大于最低满意度 S_0 , 以 $S_0=0.8$ 为例, 山西的满意度 0.878、河北的满意度 0.945 均大于 0.8, 符合最低满意度约束, 实现了各区域主体对配水方案的满意程度高于流域管理机构所设定的最低满意度, 保障了水资源配置的公平性。

(2) 当最低满意度 S_0 值过低时, 即当流域管理机构过于强调分水效率高于分水公平性时, 容易造成部分区域水资源需求全部得到满足, 而另一部分区域处于严重缺水状态。以 $S_0=0.2$ 为例, 河北得到的分配水量等于其需水量 1.0633 亿 m^3 , 不存在缺水, 而山西省的缺水率却达到 14%, 因此, 应避免出现这类情况。

(3) 山西省和河北省在供水量、地区人口和现状用水方面的差别, 通过在分水活动中的决策权重差异得以体现: 两省各自满意度高于最低满意度的部分(差异满意度)与各自决策权重成正比, 以 $S_0=0.8$ 为例, $(0.878-0.8)/0.347=(0.945-0.8)/0.653$, 体现了两省在分水活动决策中的差异性, 有利于提高两省对分水方案的满意程度。

(4) 当最低满意度 S_0 由 0.8 至 0.2 逐渐变小, 山西的满意度由 0.878 逐渐降低至 0.719, 河北的满意度由 0.945 提高至 1, 山西和河北之间的差异满意度由

0.067 增大为 0.281, 表明最低满意度调低后, 流域水资源管理者增强了对用水主体个体差异的重视程度, 更侧重于分水活动的高效性: 流域经济效益由 280.162 3 亿元逐渐增加至 283.613 3 亿元。反之, 当最低满意度 S_0 由 0.2 至 0.8 逐渐变大, 山西和河北之间的差异满意度由 0.281 逐渐减小至 0.067, 流域水资源管理者更强调水资源配置的公平性。

5 结论

本文所构建的考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置模型兼顾了集体理性和个体理性, 既从流域分水主体角度考虑了配置方案的合理性, 又从用水主体角度考虑了分水方案的可行性, 使得分水方案在体现流域整体利益的同时, 兼顾了用水个体的利益诉求, 提高了用水主体对配置方案的满意度, 进而提高了流域水资源配置方案的可行性。

分析表明, 最低满意度取值的高低, 既反映了流域水资源管理者对水资源配置公平性和效率的重视程度, 又反映了用水主体对配水方案满意度的差异性: 最低满意度设置较低, 流域管理者更强调水资源配置的效率, 用水主体对配水方案满意度差异较大; 反之, 流域管理者更强调水资源配置的公平性, 用水主体对配水方案满意度差异较小。因此, 在流域水资源配置过程中, 流域管理机构可以通过调节最低满意度参数实现兼顾公平和效率的水资源配置。

参考文献(References):

- [1] 金晶, 唐德善, 李晓英. 基于 AHP-模糊决策模型的水资源配置方案优选[J]. 水电能源科学, 2013, (7): 33-35. [Jin J, Tang D S, Li X Y. Scheme optimization of water resources allocation based on AHP-Fuzzy decision model[J]. *Water Resources and Power*, 2013, (7): 33-35.]
- [2] 王佩. 基于 FAHP 与熵权法水资源配置指标权重融合[J]. 水电能源科学, 2015, (1): 20-22. [Wang P. Weight fusion of water resources allocation index based on FAHP and entropy methods[J]. *Water Resources and Power*, 2015, (1): 20-22.]
- [3] 李宗礼, 李新攀, 赵文举, 等. 基于多目标遗传算法的石羊河流域水资源优化配置模型[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 52-55. [Li Z L, Li X P, Zhao W J, et al. Optimization allocation model of water resources of Shiyang river basin based on multi-ob-

2018年1月

- jective genetic algorithm[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2013, 39(2): 52–55.]
- [4] 王永涛, 杨璐瑶, 张和喜, 等. 基于多目标优化的黔中区水资源配置研究[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 32–36. [Wang Y T, Yang L Y, Zhang H X, et al. Research on water resources allocation in central Guizhou based on multi-objective optimization[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 32–36.]
- [5] 何国华, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 214–220. [He G H, Wang N, Xie J C, et al. Establishment and application of fuzzy comprehensive assessment model for harmony of water allocation based on entropy weight[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2016, 44(2): 214–220.]
- [6] 娄帅, 王慧敏, 牛文娟, 等. 基于区间直觉模糊集的水资源配置群决策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 319–327. [Lou S, Wang H M, Niu W J, et al. Research on the water resources allocation group decision-making based on interval-valued intuitionistic fuzzy set[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3): 319–327.]
- [7] 付银环, 郭萍, 方世奇, 等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 73–81. [Fu Y H, Guo P, Fang S Q, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 73–81.]
- [8] 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. [Sun D Y, Wang H M, Yu J. Study on optimal allocation of water resources in basin based on cooperative game under fuzzy coalition[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(12): 153–158.]
- [9] 刘年磊, 蒋洪强, 吴文俊. 基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1607–1613. [Liu N L, Jiang H Q, Wu W J. Empirical research of optimal allocation model of water resources under uncertainties[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1607–1613.]
- [10] 陈义忠, 卢宏伟, 李晶, 等. 基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2252–2261. [Chen Y Z, Lu H W, Li J, et al. Empirical research on bi-level allocation model of water resources under uncertainty[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6): 2252–2261.]
- [11] 叶健, 刘洪波, 闫静静. 不确定性模糊多目标模型在生态城市水资源配置中的应用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 1001–1007. [Ye J, Liu H B, Yan J J. Application of inexact fuzzy multi-objective model on water resources allocation in an ecological city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 1001–1007.]
- [12] Kronaveter L, Shamir U. Negotiation support for cooperative allocation of a shared water resource: Methodology[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2009, 135(2): 60–69.
- [13] Urtiga M M, Morais D C. Pre-negotiation framework to promote cooperative negotiations in water resource conflicts through value creation approach[J]. *EURO Journal on Decision Processes*, 2015, 3(3–4): 339–356.
- [14] 王贵作, 刘定湘. 流域管理与行政区域管理协商机制建设现状、问题及对策[J]. 水利发展研究, 2012, (7): 23–26. [Wang G Z, Liu D X. The construction situation, problems and countermeasures of the consultation management mechanism of river basin and administrative zone[J]. *Water Resources Development Research*, 2012, (7): 23–26.]
- [15] 陈刚, 顾世祥, 杨霄, 等. 集中分配模式下跨界河流量分配协商模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (10): 37–41. [Chen G, Gu S X, Yang X, et al. A negotiation model for centralized water quantity allocation in a trans-boundary river[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (10): 37–41.]
- [16] 贺骥, 刘毅, 张旺, 等. 松辽流域初始水权分配协商机制研究[J]. 中国水利, 2005, (9): 16–18. [He J, Liu Y, Zhang W, et al. Studies on consultation system for initial water right distribution in the Songliao river basin[J]. *China Water Resources*, 2005, (9): 16–18.]
- [17] 胡晓寒, 秦大庸, 李海红, 等. 水资源使用权初始分配协商模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 562–567. [Hu X H, Qin D Y, Li H H, et al. Negotiation model of initial water utilization right allocation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 562–567.]
- [18] 河海大学. 漳河上游水资源供需分析及调配研究[R]. 河海大学, 2014. [Hohai University. The analysis of the supply and demand and the research on allocation of water resources of the upstream of the Zhanghe River[R]. Hohai University, 2014.]

Optimal water resource allocation of the river basin considering the water body satisfaction degree

CHU Yu^{1,2}

(1. Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, water resource allocation of river basins in China is mainly based on the hypothesis of collective rationality and from the perspective of the single decision body so as to maximize benefits to the whole river basin. For failing to fully consider the negotiation will and interests of various water bodies in the river basin, the bodies' satisfaction degree of water distribution scheme is always low and scheme execution resistance is generally high. We define the concept of the satisfaction degree of water body to measure bodies' satisfaction level of water resource allocation schemes. On this basis, we further propose the satisfaction degree principle, and quantify it to two functions (the lowest satisfaction degree function and the difference satisfaction degree function) to provide water bodies with a participation channel in river basin water allocation decision-making. Combining basic water allocation principles and satisfaction degree principles, we build an optimal water resources allocation model of river basins, and validity is verified using the Qingzhang River Basin. We found that the built model conforms with the principle of equity; the level of the satisfaction degree of various areas in the river basin to the water diversion scheme is positively correlated with these areas' own decision-making weight; and the lower the lowest satisfaction degree is set, the more river basin water resource managers focus on the efficiency of water activities. And in contrast, the higher the lowest satisfaction degree is set, the more the managers pay attention to the fairness of water activity.

Key words: river basin water resources; optimal allocation; water body; satisfaction degree function; Qingzhang River Basin