网络出版时间:2019-04-22 17:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.11.015
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190422.1734.030.html

博弈论与 DS 证据理论耦合的黄河流域水资源配置方案评价

张淑林[a],粟晓玲[a,b]

(西北农林科技大学 a 水利与建筑工程学院,b 旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】从资源、社会、经济、效率多角度构建水资源配置方案综合评价模型,为水资源最佳配置方案的遴选提供依据。【方法】在传统仅以水质、水量作为自然资源评价指标的基础上,综合考虑量、质、域、流 4 个维度,从资源、社会、经济、效率多角度构建水资源配置方案评价指标体系,采用博弈论将层次分析法和 CRITIC 法综合赋权确定指标权重,同时耦合 DS 证据理论,建立水资源配置方案综合评价模型,并以黄河流域水资源配置为例,分别对 2015 年及 2020,2030 年共 9 种配置方案进行评价和比较。【结果】利用所建立的水资源配置方案综合评价模型,对黄河流域水资源配置方案的评价表明,黄河流域 2020 年以同时考虑调水 12.63 亿 m^3 和节水 67.90 亿 m^3 的方案 E 的综合评价结果最优,2030 年则以同时考虑调水 97.63 亿 m^3 和强化节水 86.70 亿 m^3 的方案 I 的综合评价效果最优。通过对比自然、社会、经济以及效率准则的评价方案可知,黄河流域节水措施的实施提高了经济效益,同时考虑节水和调水有利于当地水资源的协调发展,能有效提高社会效益。【结论】博弈论与 DS 证据理论耦合,克服了以往水资源评价指标赋权的片面性和主观随意性,可以实现多源评价指标信息融合,使得评价结果更为客观合理,为水资源配置方案评价提供了新思路。

[关键词] 水资源配置评价;博弈论;DS 证据理论;黄河流域

[中图分类号] TV213.9 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2019)11-0123-11

Evaluation of water resource allocation scheme based on game theory and DS evidence theory in the Yellow River Basin

ZHANG Shulin[a],SU Xiaoling[a,b]

(a *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *b Key Laboratory of Agricultural Soil Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Object】 Comprehensive evaluation model of water resource allocation scheme was built based on the perspective of resource, society, economy, efficiency to provide basis for selection of best water resource allocation. 【Method】 Different from the traditional use of water quality and water quantity as natural resource evaluation indexes, four dimensions of quantity-quality-aquatorium-flow were considered, and the evaluation index system of water resource allocation schemes was established from the perspectives of resources, society, economy and efficiency. Using game theory to combine AHP and CRITIC to calculate weight of indicators and couplying DS evidence theory, the comprehensive evaluation model of water resource was established. Taking the water resource allocation of the Yellow River Basin as an example, the

[收稿日期] 2018-11-19
[基金项目] "十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0401306)
[作者简介] 张淑林(1994—),女,陕西凤翔人,在读硕士,主要从事水资源配置研究。E-mail:1105536015@qq.com
[通信作者] 粟晓玲(1968—),女,四川开江人,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:suxiaoling17@126.com

nine water resource schemes in 2015,2020 and 2030 were then evaluated.【Result】 The evaluation of water resource allocation scheme in the Yellow River Basin indicated that the best scheme E in 2020 considered water diversion of 12.63×10^8 m^3 and water saving of 67.90×10^8 m^3. The scheme I considering water diversion of 97.63×10^8 m^3 and water saving of 86.70×10^8 m^3 was the best in 2030. By comparing the evaluation schemes of resource, social, economic and efficiency, the water saving measure can improve economic benefits, the measure considering both water saving and water diversion was conducive to the coordinated development of water resources, and enhance the social benefit effectively.【Conclusion】 The combination of game theory and DS evidence theory can overcome the one-sidedness and subjective randomness in the weights of water resource evaluation indexes. The results were objective and reasonable, and the paper would provide a new way for the evaluation of water resource allocation.

Key words: evaluation of water resource allocation; game theory; DS evidence theory; Yellow River Basin

水资源短缺是当今世界面临的主要资源环境问题[1]。中国水资源总量居世界第六,人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4,是世界上13个贫水国之一[2]。21世纪以来,随着我国经济的发展,水资源短缺和水污染等问题已经成为制约我国经济发展的关键要素。为有效解决水资源供需缺口大、水资源利用效率低等问题,实现资源、社会、经济和生态环境的协调发展,迫切需要对水资源进行优化配置。水资源配置并非区域之间或部门之间简单的水量分配,更多的是从流域整体出发,涉及水资源供需平衡分析,水资源、自然资源的保护以及不同水利工程设施约束下的水资源合理分配[3-4],是一个典型的多维度、多目标、群决策的半结构化的复杂问题。这一特点导致了水资源配置方案评价体系的复杂性,因此有必要完善现有的水资源配置评价体系,建立更加适宜的评价模型。目前,国外多将水资源-经济进行耦合,建立基于水市场的水资源配置方案评价模型[5-7]。许多学者采用不同的评价方法进行了水资源配置方案研究,如模糊BP神经网络模型[8]、模糊优选法[9-13]、主成分分析法[14]、区间数结合层次分析法[15]、TOPSIS-灰色关联度分析法[16]、TOPSIS法[17]等,上述方法虽有效推动了水资源配置评价的发展,但在实际应用中仍存在诸多不足。主成分分析法在处理高维变量问题时,容易遗失信息;模糊综合评价在确定隶属函数时,具有"主观任意性",使得最终结果趋向同一化,弱化了不同方案之间的差异特征;应用BP人工神经网络以及支持向量机等智能优化算法时存在计算时间过长、易陷入局部最优解等缺陷。同时,以往水资源配置评价权重多采用单一的主观或客观法赋权法[10],主观赋权依靠专家对该指标重要程度的认识赋权,具有一定的主观性;客观赋权法通过数理计算的方法获得指标权重,虽然能在一定程度上消除人为主观因素的影响,但是计算结果不能完全反映指标的重要性,甚至出现与实际相悖的情况。为了解决评价指标主观和客观赋权的不确定性,有学者采用综合赋权法,即通过线性组合将主客观赋权法结合起来确定综合权重[18],但目前线性组合系数的确定往往采用简单平均或加权平均,存在一定的不合理性,进而会对评价结果产生一定影响。

为了弥补目前水资源配置评价存在的不足,实现水资源配置方案的合理优选,本研究在传统仅考虑水量、水质等自然资源指标的基础上,结合王建华等[19]从量、质、域、流4个维度对水资源承载力新内涵的认识,扩充水资源配置评价中的自然资源评价指标,建立基于资源、社会、经济、效率的水资源配置方案评价指标体系,并将主观赋权的层次分析法(AHP)与客观赋权的CRITIC法相结合,采用博弈论确定综合权重中的比例系数,计算综合权重,同时引用考虑权重的DS证据理论构建水资源配置方案综合评价模型,以期为黄河流域水资源配置方案的综合评价提供支持。

1 水资源配置方案的综合评价

首先对指标进行无量纲化处理,即:

正向指标:

$$a'_{ij}=\frac{a_{ij}}{a_{j\max}+a_{j\min}}; \tag{1}$$

负向指标:

$$a'_{ij}=\frac{a_{j\max}+a_{j\min}-a_{ij}}{a_{j\max}+a_{j\min}}。 \tag{2}$$

式中:a'_{ij}为转换后的指标值;a_{ij}为原指标值;$a_{j\max}=$

$\max\{a_{1j},a_{2j},\cdots,a_{mj}\}$，$a_{j\min}=\min\{a_{1j},a_{2j},\cdots,a_{mj}\}$，其中 m 为指标数量。

1.1　权重的确定

1.1.1　*层次分析法*(AHP)　主观赋权可以有效表达决策者对评价指标的偏好，目前使用较多的主观赋权法有 Delphi 法[20]、AHP 等。AHP 的基本原理是将一个复杂问题转化为层次结构模型，将同一层次上的要素以上一要素为准则，通过构造判断矩阵两两比较，进而计算出每一要素的权重[21-22]。

1.1.2　*CRITIC 法*　CRITIC 权重计算法是 1995 年由 Diakoulaki 等[23]提出的一种客观赋权法，该方法既能反映指标的对比强度，又能反映指标之间的冲突性。指标的对比强度即同一评价指标不同方案的差异，用标准差来表示；指标之间的冲突表示不同评价指标的差异，用负相关系数来表示[24]。

假设有 m 个方案集 P，即 $P=\{P_1,P_2.\cdots,P_m\}$，其指标集有 n 个，表示为 $S=\{S_1,S_2,\cdots S_n\}$，则第 i 个方案的第 j 个指标表示为 a_{ij}，$i=1,2,3,\cdots,m$；$j=1,2,3,\cdots n$，$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{m\times n}$ 为决策矩阵。指标 j 所包含的全部信息量 C_j 可表示为：

$$C_j=\sigma_j\sum_{t=1}^{n}(1-r_{tj}),j=1,2,\cdots n。\tag{3}$$

式中：σ_j 表示评价指标 j 的标准差，r_{tj} 表示指标 t 与指标 j 之间的相关系数。σ_j 越大，表明该指标包含的信息量越大，r_{tj} 越小，表明指标之间的冲突越少，包含的信息量越多，因此，C_j 越大指标权重越大。指标权重 u_j 可表示为：

$$u_j=C_j/\sum_{t=1}^{n}C_j,j=1,2,\cdots,n。\tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}u_1\cdot u_1^{\mathrm{T}} & u_1\cdot u_2^{\mathrm{T}} & \cdots\\ u_2\cdot u_1^{\mathrm{T}} & u_2\cdot u_2^{\mathrm{T}} & \cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ u_L\cdot u_1^{\mathrm{T}} & u_L\cdot u_2^{\mathrm{T}} & \cdots\end{bmatrix}$$

根据式(7)可计算得出 $a_k=(a_1,a_2,\cdots,a_L)$，并进行归一化处理，有：

$$a_k^*=a_k/\sum_{k=1}^{L}a_k。\tag{8}$$

式中：a_k^* 表示不同赋权方法经优化后的线性组合系数。

因此，由博弈论得到的组合权重为：

$$u^*=\sum_{k=1}^{L}a_k^*\cdot u_k^{\mathrm{T}}。\tag{9}$$

式中：u^* 为最终计算的组合权重值。

1.3　DS 证据理论

DS 证据理论是由 Dempster[30] 和 Shafer[31] 提出并发展的一种数学推理理论，其核心思想是将证据进行融合。假设 $\theta=\{\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n\}$ 为一个互斥的非空集合，该理论的识别框架 Θ 由 θ 的所有子集组合而成，即 $\Theta=\{\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n,\{\theta_1,\theta_2\},\{\theta_1,\theta_3\},\cdots,\theta\}$，$A$ 是集合 Θ 上的任意子集，本研究中表示水资源配置方案集。框架上的基本概率分配(Basic probability assignment，BPA)是一个满足 $2\Theta\to[0,1]$ 的函数 m，称为 mass 函数。$\forall A\subseteq\Theta$，$m(A)$ 称为 A 的基本概率分配值，即某一评价指标的基本概率分配值，满足 $m(\varphi)\neq0$，$m(A)\leqslant1$，且 $\sum_{A\subseteq\Theta}m(A)=1$，其中 $m>0$

1.2　博弈论综合赋权

水资源配置评价是一个涉及资源、社会、经济和效率的复杂综合系统，指标权重的合理确定，是水资源配置评价的一个重要环节。为了解决综合权重比例系数确定的随意性[25]，采用博弈论将 AHP 得到的主观赋权法和 CRITIC 法得到的客观赋权法相结合，得到更加合理的指标权重。

博弈论(Game theory)是用来平衡决策主体之间行为的理论，其基本思想是使各个基本赋权方法得到的权重和最终计算出的综合权重之间的偏差最小化，使各个赋权法得到的权重更加协调、均衡，最终的指标权重更加合理[26]。具体方法如下[27-29]：

假设使用 L 种方法对 n 个指标的权重进行计算，构成权重集 $u_k=\{u_{k1},u_{k2},\cdots,u_{kn}\}$，$k=1,2,\cdots,L$。将 L 种向量的线性组合记为：

$$u=\sum_{k=1}^{L}a_ku_k^{\mathrm{T}},a_k>0,\sum_{k=1}^{L}a_k=1。\tag{5}$$

式中：u 为权重集的一种可能权重向量，a_k 为不同赋权方法的线性组合系数。为了实现可能权重 u 与各基本权重之间的偏差极小化，需要对式(5)的线性组合系数进行优化，即：

$$\min=\left\|\sum_{k=1}^{L}a_ku_k^{\mathrm{T}}-u_i\right\|_2,i=1,2,\cdots,L。\tag{6}$$

式中：u_i 表示为第 i 种赋权方法得到的指标权重向量。

根据矩阵微分性质，计算式(5)最优化一阶导数为：

$$\begin{bmatrix}u_1\cdot u_L^{\mathrm{T}}\\ u_2\cdot u_L^{\mathrm{T}}\\ \vdots\\ u_L\cdot u_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_1\\ a_2\\ \vdots\\ a_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_1\cdot u_1^{\mathrm{T}}\\ u_2\cdot u_2^{\mathrm{T}}\\ \vdots\\ u_L\cdot u_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}。\tag{7}$$

的 A 称为焦元，A 的信任函数 $\mathrm{bel}(A)=\sum_{B\subseteq A} m(B)$。对于 $\forall A\subseteq\Theta$ 取 Θ 上的集函数 m_1、m_2，根据 DS 合成法则可知：

$$m(A)=(m_1\oplus m_2)(A)=$$

$$\begin{cases}0, A=\varphi;\\ \dfrac{1}{k}\sum\limits_{P_i\cap O_j=A} m_1(P_i)m_2(O_j), A\neq\varphi。\end{cases}\tag{10}$$

$$k=1-\sum_{P_i\cap O_j=\varphi} m_1(P_i)m_2(O_j)。\tag{11}$$

式中：φ 表示空集，P_i、O_j 分别为 m_1、m_2 的焦元。该方法可推广到多个函数 m 上。

本研究引入权重因子，综合考虑不同指标的重要性，使得计算的结果更加合理。由式(9)可得指标综合权重 $u^*=\{u_1^*, u_2^*, \cdots, u_m^*\}$，设 $u'=\max\{u_1^*, u_2^*, \cdots, u_m^*\}$，则相对权重为 $\mu=\dfrac{u_t^*}{u'}$，其中 $t=1,2,\cdots,m$。考虑权重后的基本分配函数可以表示为 $m_i^*(P_i^*)=\mu_i\times m_i(P_i)$，其中 i 为焦元数[32]。将 $m_i^*(P_i^*)$ 带入式(10)，根据计算的 $m(A)$，其中计算值最大的方案即为最佳水资源配置方案。

2 黄河流域水资源配置方案评价

2.1 黄河流域概况

黄河是我国第二长河，流经青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等省(区)(图 1)，地理坐标为 95°53′～119°05′E、32°10′～41°50′N，流域面积 79.5 km^2。黄河以内蒙古自治区托克托县的河口镇和河南省郑州市的桃花峪为界，划分为上、中、下游。流域年均降水 456 mm，从东南到西北呈减少趋势，且蒸发剧烈[33]，大部分区域属于干旱区和半干旱区，多年平均水资源量为 647 亿 m^3，人均水资源量为 517 m^3，多年平均河川径流量为 534.8 亿 m^3。流域土地资源、矿产资源和能源资源十分丰富，在我国经济建设中占有重要地位。近年来，国家经济向中西部倾斜，黄河流域社会经济得到快速发展，加上气候变化等影响，流域水资源量呈减少趋势[34]，水资源供需矛盾增大，缺水形势严峻，亟待对该地区水资源进行合理配置。

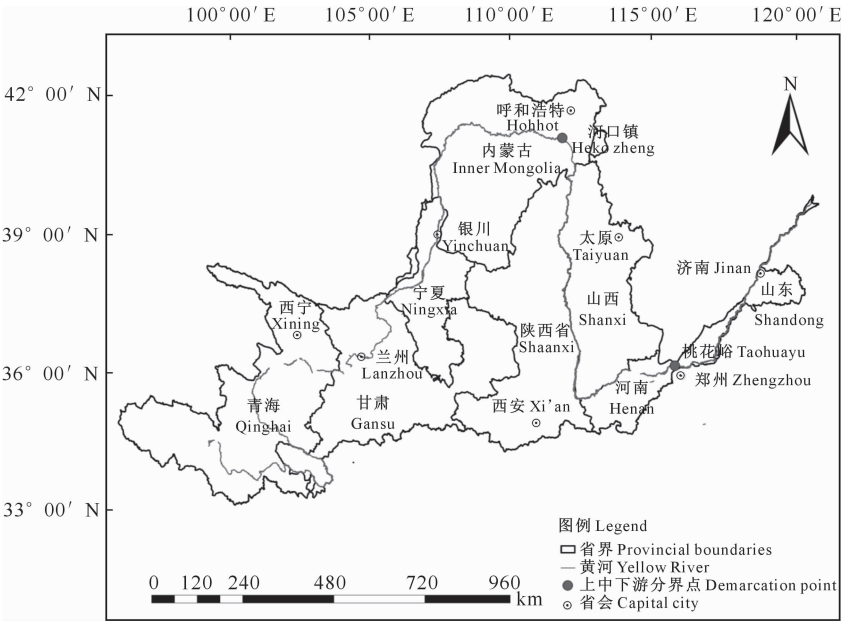

图 1 黄河流域示意图

Fig. 1 Map of the Yellow River Basin

2.2 黄河流域水资源配置方案设置和指标体系选取

以 2015 年为现状水平年，2020 年和 2030 年分别为中、长期规划水平年，结合黄河流域综合规划[35]，筛选出可行的、具有代表性的水资源配置方案，见表 1。其中，2020 年方案 C 调水工程包括引汉济渭一期工程调水 10.00 亿 m^3，引乾济石 0.47 亿 m^3，引红济石 0.90 亿 m^3 以及南水北调东线工程调入山东省 1.26 亿 m^3；方案 D 节水 67.90 亿 m^3；方案 E 同时考虑节水和调水措施。2030 年方案 G 在 2020 年调水的基础上增加引汉济渭二期工程调水 5.00 亿 m^3，南水北调西线一期工程调水 80.00 亿 m^3；方案 H 在 2020 年方案 C 的基础上增加节水 86.70 亿 m^3；方案 I 同时考虑节水和调水措施，即在

方案 G 的基础上节水 86.70 亿 m^3。

水资源配置评价涉及水资源系统、社会经济系统和生态环境系统，是一个多目标、多层次的复杂系统。为了能够全面表征水资源配置评价结果的客观性及合理性，增加评价结果的准确性和科学性，本研究依据全面性、代表性、独立性、可行性等原则，以资源、经济、社会、效率为准则构建水资源评价指标体系。水域空间和水流状态是水资源开发利用的重要约束因素，水域空间是一个区域在满足水资源开发的同时，合理预留一定的水体水面、滩涂、滨岸等空间，具有保证水生生物、候鸟栖息地和进化水体的作用，水流状态是用来表征区域河湖水体水流过程被扰动的程度，若河流阻隔过度，将会带来一定的水生态压力，因此，保证合理的水域空间面积，维持水流状态稳定，是维护水生态系统健康的重要举措。

表 1　黄河流域水资源配置方案

Table 1　Water resources allocation schemes in the Yellow River Basin

方案 Plan	年份 Year	调水量/亿 m^3 Water diversion					节水量/亿 m^3 Water saving
		引汉济渭 Yinhan jiwei	引乾济石 Yinqian jishi	引红济石 Yinhong jishi	南水北调东线工程 Eastern line project of the South to North Water Diversion Project	南水北调西线工程 Western line project of the South to North Water Diversion Project	
A	2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	2020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	2020	10.00	0.47	0.90	1.26	0.00	0.00
D	2020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	67.90
E	2020	10.00	0.47	0.90	1.26	0.00	67.90
F	2030	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G	2030	15.00	0.47	0.90	1.26	80.00	0.00
H	2030	10.00	0.47	0.90	1.26	0.00	86.70
I	2030	15.00	0.47	0.90	1.26	80.00	86.70

本研究的自然资源准则除考虑传统水质和水量要素外，还将水域和水流作为评价指标，将资源层细化为量（人均水资源占有量（m^3）、产水模数（m）、人均用水量（m^3）、地表水资源利用程度（%）、地下水资源利用程度（%）、生态环境用水满足程度（%））、质（入河废水占总用水比例（%）、水功能区达标率（%））、域（水域面积比例，即水域面积与总面积的比值）、流（基流指数，即连续 3 个月平均径流最小值与年平均径流的比值）4 个维度。其中人口、GDP、研究区面积、地表水资源量、地下水资源量与生活、生产和生态需水量及不同配置方案下的供水量、灌溉水有效利用系数、工业用水重复利用率、管网漏损率、废污水排放量、主要工程建设成本等，参考《黄河流域综合规划（2012－2030）》获得；主要工程单方水成本采用主要工程投资与供水量的比值求得；水功能区达标率来源于各省《水资源公报》及《十三五规划报告》；流量资料来源于黄河流域主要水文站统计数据；水域面积采用 GIS 进行提取，规划年水域面积来自各省《湿地保护修复制度方案》。以黄河流域总体为例，列出其具体指标值见表 2。表 2 供水结构为地表水供水量与地下水供水量的比值；主要工程单方水投资计算时，将工程投资按照公式：$I_P=\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N-1}$ 分摊到某一年，式中 I_P 为分摊后的工程投资，i 为利率，N 为还款时间，分别取值为 $i=8\%$，$N=30$。

表 2　水资源配置方案评价指标体系及黄河流域评价指标取值

Table 2　Evaluation indexes of water resource allocation scheme and values in the Yellow River Basin

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	方案 Plan								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
资源 Resource	人均水资源占有量/m^3 Average per capita water resource	574.58	531.35	541.33	585.00	594.99	513.68	588.30	579.91	654.53
	产水模数/m Water production modules	9.01	8.91	9.08	9.81	9.98	8.91	10.21	10.06	11.36
	人均用水量/m^3 Per capita water consumption	328.68	344.99	353.94	345.02	353.94	338.42	400.40	338.42	400.40
	地表水资源利用程度/% Development and utilization degree of surface water resources	41.43	49.83	51.69	49.83	51.69	49.15	62.51	49.15	62.51
	地下水资源利用程度/% Development and utilization degree of groundwater resources	32.36	32.38	32.38	32.38	32.38	33.07	33.07	33.07	33.07
	生态环境用水满足程度/% Satisfaction degree of ecological environment water	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表2(续) Continued table 2

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	方案 Plan								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
资源 Resource	入河废水占总用水比例/% The proportion of wastewater entering the river to total water	8.26	8.89	8.67	8.89	8.67	8.97	7.58	8.97	7.58
	水功能区达标率/% Water function area compliance rate	59.00	80.00	80.00	80.00	80.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	水域面积比例 Water area ratio	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
	基流指数 Base flow index	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.31	0.33	0.33	0.35
社会 Society	缺水率/% Water lacking rate	20.43	25.46	23.30	15.72	13.28	30.12	14.71	19.06	1.21
	供水结构 Water supply structure	0.49	0.40	0.39	0.40	0.39	0.42	0.33	0.42	0.33
经济 Economy	单方水 GDP/(元·m^{-3}) GDP of per cubic meter water	126.93	67.83	67.83	76.72	76.72	121.14	121.14	140.32	140.32
	主要工程单方水成本/(元·m^{-3}) Per cubic meter water cost of main projects	0.90	0.90	0.92	0.77	0.80	0.92	1.61	0.89	1.37
	单方水 GDP 增长率/% Increase-rate of Per cubic meter water	260.31	107.83	107.83	134.97	134.97	271.17	271.17	329.94	329.94
效率 Effectiveness	灌溉水有效利用系数 Coefficient of irrigation water effective utilization	0.49	0.50	0.50	0.56	0.06	0.56	0.56	0.59	0.59
	工业用水重复利用率/% Industrial water recycling rate	61.00	75.00	75.00	85.00	85.00	85.00	85.00	88.00	88.00
	管网漏损率/% Water loss rate	18.00	13.00	13.00	12.80	12.80	11.00	11.00	10.00	10.00

2.3 黄河流域水资源配置评价模型的构建

以黄河流域为例,采用公式(1)~(9)计算流域资源、社会、经济、效率各准则层的权重以及流域水资源配置评价指标的综合权重,结果见表3和表4。

表3 黄河流域资源、社会、经济、效率各准则层水资源配置评价指标的权重

Table 3 Weights of water resource allocation evaluation indexes of resource, society, economy and efficiency criteria layers in the Yellow River Basin

准则层 Criterion layer	指标 Index layer	AHP	CRITIC	博弈论 Game theory	博弈论相对值 Relative value of game theory
资源 Resource (0.535 1)	人均水资源占有量/m^2 Average per capita water resources	0.15	0.07	0.09	0.39
	产水模数/m Water production modules	0.08	0.07	0.07	0.31
	人均用水量/m^3 Per capita water consumption	0.19	0.07	0.10	0.43
	地表水资源利用程度/% Development and utilization degree of surface water resources	0.07	0.28	0.23	1.00
	地下水资源利用程度/% Development and utilization degree of groundwater resources	0.08	0.02	0.04	0.16
	生态环境用水满足程度/% Satisfaction degree of ecological environment water	0.05	0.00	0.01	0.06
	入河废水占总用水比例/% The proportion of wastewater entering the river to total water	0.08	0.07	0.08	0.34
	水功能区达标率/% Water function area compliance rate	0.11	0.19	0.17	0.75
	水域面积比例 Water area ratio	0.09	0.20	0.18	0.78
	基流指数 Base flow index	0.09	0.03	0.05	0.20
社会 Society (0.235 2)	缺水率/% Water lacking rate	0.86	0.41	0.73	1.00
	供水结构 Water supply structure	0.14	0.59	0.27	0.36
经济 Economy (0.144 9)	单方水 GDP/(元·m^{-3}) GDP of per cubic meter water	0.45	0.25	0.37	1.00
	主要工程单方水成本/(元·m^{-3}) Per cubic meter water cost of main projects	0.31	0.39	0.35	0.95
	单方水 GDP 增长率/% Increase-rate of Per cubic meter water	0.24	0.36	0.29	0.79
效率 Effectiveness (0.084 8)	灌溉水有效利用系数 Coefficient of irrigation water effective utilization	0.58	0.27	0.45	1.00
	工业用水重复利用率/% Industrial water recycling rate	0.26	0.22	0.24	0.54
	管网漏损率/% Water loss rate	0.16	0.51	0.31	0.69

注:准则层"()"内数值为AHP法权重值。

Note: The value in "()" is the weight of AHP.

表 4　黄河流域水资源配置评价指标的综合权重

Table 4　Comprehensive weights of water resource allocation evaluation indicators in the Yellow River Basin

指标 Index layer	AHP	CRITIC	博弈论 Game theory	博弈论相对值 Relative value of game theory
人均水资源占有量/m^3 Average per capita water resources	0.08	0.02	0.05	0.37
产水模数/m Water production modules	0.04	0.02	0.03	0.24
人均用水量/m^3 Per capita water consumption	0.10	0.02	0.06	0.46
地表水资源利用程度/% Development and utilization degree of surface water resources	0.04	0.08	0.06	0.50
地下水资源利用程度/% Development and utilization degree of groundwater resources	0.04	0.01	0.02	0.16
生态环境用水满足程度/% Satisfaction degree of ecological environment water	0.03	0.14	0.01	0.75
入河废水占总用水比例/% The proportion of wastewater entering the river to total water	0.05	0.02	0.03	0.26
水功能区达标率/% Water function area compliance rate	0.06	0.06	0.06	0.47
水域面积比例 Water area ratio	0.05	0.06	0.06	0.46
基流指数 Base flow index	0.05	0.01	0.03	0.22
缺水率/% Water lacking rate	0.12	0.10	0.12	1.00
供水结构 Water supply structure	0.02	0.14	0.09	0.74
单方水 GDP/(元·m^{-3}) GDP of per cubic meter water	0.16	0.14	0.10	0.84
主要工程单方水成本/(元·m^{-3}) Per cubic meter water cost of main projects	0.03	0.03	0.07	0.57
单方水 GDP 增长率/% Increase-rate of Per cubic meter water	0.05	0.04	0.03	0.25
灌溉水有效利用系数 Coefficient of irrigation water effective utilization	0.05	0.02	0.03	0.27
工业用水重复利用率/% Industrial water recycling rate	0.02	0.04	0.03	0.26
管网漏损率/% Water loss rate	0.01	0.05	0.03	0.28

将归一化处理后的水资源配置评价指标作为基本分配函数，再与博弈论相对权重相乘，将其乘积作为考虑权重的基本概率分配函数 $m_i^*(P_i^*)$，并将其带入公式(10)和(11)，根据计算结果大小，筛选出最优的水资源配置方案。

2.4　黄河流域水资源配置评价结果及分析

基于博弈论和 DS 证据理论耦合模型，对不同水资源配置方案下黄河流域总体及其各省(区)的综合评价结果见表 5，对黄河流域资源、社会、经济、效率准则层的评价结果见表 6～9。从表 5 可知，黄河流域 2015 年的评价结果为0.042 0；2020 年方案 B、C、D、E 的评价结果分别为 0.011 0，0.012 0，0.031 6和 0.034 2，其中考虑了节水措施的方案 D 和方案 E 的评价结果优于 2020 年的其他方案；2030 年方案 F、G、H、I 的评价结果分别为 0.120 0，0.117 9，0.287 2 和 0.344 1，其中同时考虑节水和调水措施的方案 I 的评价结果优于 2030 年其他方案，且 2030 年最优方案 I 明显优于 2020 年最优方案 E 和 2015 年方案 A。

表 5　黄河流域及各省区水资源配置方案综合评价结果

Table 5　Comprehensive evaluation results of water resource allocation schemes in the Yellow River Basin and different regions

方案 Plan	青海 Qinghai	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Inner Mongolia	陕西 Shaanxi	山西 Shanxi	河南 Henan	山东 Shandong	黄河流域 Yellow River Basin
A	0.124 1	0.023 0	0.010 2	0.031 6	0.010 5	0.037 1	0.114 5	0.164 7	0.042 0
B	0.005 3	0.010 4	0.000 9	0.012 2	0.005 8	0.013 7	0.006 6	0.010 9	0.011 0
C	0.006 6	0.010 7	0.000 6	0.012 5	0.006 6	0.015 2	0.006 6	0.006 3	0.012 0
D	0.024 8	0.040 9	0.034 9	0.055 9	0.020 6	0.037 2	0.021 3	0.079 6	0.031 6
E	0.025 7	0.041 8	0.023 4	0.057 3	0.020 3	0.037 5	0.021 3	0.072 2	0.034 2
F	0.087 9	0.116 8	0.019 8	0.176 1	0.125 3	0.169 3	0.085 4	0.057 9	0.120 0
G	0.204 9	0.165 1	0.033 3	0.028 4	0.163 9	0.161 6	0.119 6	0.184 8	0.117 9
H	0.200 3	0.280 1	0.446 7	0.446 3	0.280 2	0.319 1	0.280 5	0.157 8	0.287 2
I	0.320 3	0.311 2	0.430 2	0.179 7	0.366 9	0.209 2	0.344 3	0.265 8	0.344 1

对比各省区评价结果(表5)可知,2020年黄河流域各省区中,除宁夏、陕西和山东以考虑节水措施的方案D为最优外,其他地区均以同时考虑节水和调水工程的方案E最优,方案D次之。2030年青海、甘肃、陕西、河南和山东以同时考虑节水和调水措施的方案I为最优,宁夏、内蒙和山西以仅考虑节水措施的方案H最优。2020年黄河流域部分水利工程初步建成,尚未能完全发挥作用,因此考虑节水措施的方案与同时考虑节水和调水措施的方案综合评价结果相差不大。2030年节水技术逐渐成熟,工程运行更为畅通,调水工程的实施对其综合影响显著提高,同时兼顾节水与调水措施的综合效益有效改善,因此,2020年各省区应注重节水型社会建设,加大节水投资,挖掘节水潜力。2030年应注重水利工程的运行管理,尤其是要加快南水北调西线工程建设,缓解因人口增长、经济发展等因素带来的水资源短缺的影响。

表6 黄河流域资源准则层评价结果

Table 6 Evaluation of resource criteria layer in the Yellow River Basin

方案 Plan	青海 Qinghai	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Inner Mongolia	陕西 Shaanxi	山西 Shanxi	河南 Henan	山东 Shandong	黄河流域 Yellow River Basin
A	0.197 2	0.067 4	0.019 5	0.028 7	0.056 2	0.076 4	0.177 0	0.270 5	0.103 1
B	0.045 8	0.076 6	0.011 0	0.055 1	0.029 0	0.045 5	0.041 0	0.043 1	0.063 0
C	0.047 8	0.075 8	0.007 4	0.057 1	0.025 3	0.050 2	0.041 0	0.048 8	0.065 5
D	0.058 9	0.099 0	0.082 2	0.091 8	0.034 3	0.066 2	0.053 4	0.063 7	0.081 0
E	0.060 4	0.097 2	0.055 5	0.095 0	0.029 5	0.066 5	0.053 5	0.070 8	0.083 8
F	0.131 4	0.107 3	0.032 1	0.141 1	0.218 8	0.110 8	0.098 3	0.056 8	0.116 0
G	0.129 0	0.141 1	0.082 4	0.098 1	0.155 3	0.183 9	0.161 0	0.142 6	0.144 2
H	0.183 8	0.152 0	0.333 3	0.264 3	0.268 3	0.174 2	0.160 6	0.097 4	0.156 8
I	0.150 2	0.183 5	0.376 7	0.168 8	0.183 3	0.226 4	0.214 1	0.206 4	0.186 6

由表6的资源准则层评价结果可知,2020年考虑了节水措施的方案D、E较优,2030年同时考虑节水与调水的方案I最优,且2030年方案I优于2020年的方案D、E和2015年方案A。对比各省(区)评价结果可知,2020年青海、内蒙、山西、河南以及山东等省(区),均以同时考虑了节水和调水工程的方案E优于其他方案,而甘肃、宁夏和陕西以仅考虑节水措施的方案D最优。2030年,青海、内蒙和陕西以仅考虑节水的方案H最优,其他地区以同时考虑节水和调水工程的方案I最优。由此可见,同时考虑节水和调水措施的方案有利于水资源的可持续发展。

表7 黄河流域社会准则层评价结果

Table 7 Evaluation of society criteria layer in the Yellow River Basin

方案 Plan	青海 Qinghai	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Inner Mongolia	陕西 Shaanxi	山西 Shanxi	河南 Henan	山东 Shandong	黄河流域 Yellow River Basin
A	0.073 2	0.107 5	0.166 0	0.089 0	0.045 3	0.063 6	0.078 2	0.083 1	0.084 1
B	0.092 1	0.098 2	0.090 7	0.101 4	0.101 3	0.108 6	0.103 3	0.094 7	0.098 8
C	0.092 8	0.102 2	0.090 2	0.100 4	0.130 9	0.108 9	0.103 4	0.100 8	0.105 2
D	0.104 9	0.107 2	0.110 3	0.116 4	0.110 1	0.117 4	0.116 7	0.108 4	0.111 7
E	0.105 7	0.111 5	0.109 8	0.115 3	0.142 4	0.117 7	0.116 8	0.115 4	0.119 0
F	0.082 9	0.078 6	0.071 7	0.092 4	0.083 5	0.106 6	0.102 9	0.088 7	0.089 4
G	0.161 4	0.145 4	0.120 4	0.126 3	0.140 9	0.123 2	0.120 2	0.138 6	0.133 6
H	0.097 4	0.087 5	0.089 9	0.109 3	0.091 4	0.117 9	0.119 2	0.105 5	0.103 6
I	0.189 5	0.161 9	0.151 0	0.149 5	0.154 2	0.136 3	0.139 3	0.164 8	0.154 7

由表7的社会准则层评价结果可知,黄河流域2015年评价结果为0.084 1;2020年方案B、C、D、E的评价结果依次为0.098 8,0.105 2,0.111 7和0.119 0,同时考虑节水和调水措施的方案E的社会效益优于2020年其他方案;2030年方案F、G、H、I的评价结果依次为0.089 4,0.133 6,0.103 6和0.154 7,同时考虑节水和调水措施的方案I的社会效益优于同期其他方案,且2030年方案I优于2020年方案E和2015年方案A。对比各省(区)评价结果可知,2020年除宁夏和内蒙古以仅考虑节水措施的方案D的社会效益最优外,其余省区均以同时考虑节水和调水的方案E的社会效益最优。2030年,

黄河流域各省(区)均以同时考虑节水和调水的方案 I 的评价结果最优。由此可见，同时考虑节水和调水工程能有效缩小供需缺口、降低缺水率、提高社会效益。

表 8　黄河流域经济准则层评价结果

Table 8　Evaluation of economy criteria layer in the Yellow River Basin

方案 Plan	青海 Qinghai	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Inner Mongolia	陕西 Shaanxi	山西 Shanxi	河南 Henan	山东 Shandong	黄河流域 Yellow River Basin
A	0.339 9	0.119 1	0.173 5	0.297 8	0.150 7	0.188 8	0.241 7	0.289 7	0.182 4
B	0.035 6	0.045 4	0.049 4	0.057 8	0.072 7	0.057 0	0.041 3	0.077 7	0.036 4
C	0.042 1	0.045 4	0.049 4	0.057 8	0.072 7	0.057 0	0.041 3	0.037 3	0.035 8
D	0.057 3	0.059 3	0.079 3	0.069 3	0.092 8	0.067 7	0.055 7	0.108 9	0.056 0
E	0.057 3	0.059 3	0.079 3	0.069 3	0.082 1	0.067 7	0.055 7	0.083 5	0.054 9
F	0.115 0	0.213 3	0.177 6	0.179 2	0.116 5	0.202 7	0.137 9	0.108 7	0.160 9
G	0.140 3	0.123 8	0.069 2	0.030 4	0.127 3	0.100 9	0.100 9	0.088 4	0.085 1
H	0.105 9	0.223 3	0.213 9	0.163 0	0.133 6	0.179 7	0.182 0	0.136 3	0.232 1
I	0.106 5	0.111 1	0.108 6	0.075 2	0.151 7	0.078 4	0.143 4	0.069 4	0.156 4

由表 8 的经济准则层评价结果可知，黄河流域 2015 年方案 A 的评价结果为 0.182 4；2020 年方案 B、C、D、E 的评价结果分别为 0.036 4，0.035 8，0.056 0和 0.054 9，其中仅考虑节水的方案 D 的评价效果优于 2020 年其他方案，2030 年方案 F、G、H、I 的评价结果分别为 0.160 9，0.085 1，0.232 1 和 0.156 4，其中仅考虑节水的方案 H 的评价结果优于同期其他方案。对比各省(区)评价结果可知，2020 年，青海、甘肃、宁夏、内蒙、山西和河南均以考虑了节水的方案 D 和方案 E 较优，陕西和山东以仅考虑节水措施的方案 D 最优。2030 年青海省以仅考虑工程措施的方案 G 最优，内蒙古和山西以不考虑工程措施的方案 F 的经济效益最优，陕西省以同时考虑节水和调水工程措施的方案 I 的评价结果最优，其余省(区)均以仅考虑节水措施的方案 H 的评价效果最优。分析原因可能是由于未来黄河流域采用较为合理的节水措施，工程投资相对较少，大规模的调水工程虽然能增加用水量，但工程建设耗资巨大，例如 2030 年南水北调西线工程投资较高，但工程运行初期调水量有限，未能完全发挥工程的整体作用，综合经济效益并不显著。

表 9　黄河流域效率准则层评价结果

Table 9　Evaluation of effectiveness criteria layer in the Yellow River Basin

方案 Plan	青海 Qinghai	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Inner Mongolia	陕西 Shaanxi	山西 Shanxi	河南 Henan	山东 Shandong	黄河流域 Yellow River Basin
A	0.059 4	0.056 3	0.046 9	0.062 4	0.055 9	0.080 9	0.072 9	0.045 6	0.047 0
B	0.059 4	0.056 3	0.046 9	0.062 4	0.055 9	0.080 9	0.072 9	0.045 6	0.088 5
C	0.059 4	0.056 3	0.046 9	0.062 4	0.055 9	0.080 9	0.072 9	0.045 6	0.088 5
D	0.117 2	0.120 4	0.125 1	0.124 8	0.120 5	0.117 5	0.117 9	0.140 8	0.113 8
E	0.117 2	0.120 4	0.125 1	0.124 8	0.120 5	0.117 5	0.117 9	0.140 8	0.113 8
F	0.117 2	0.120 4	0.125 1	0.124 8	0.120 5	0.117 5	0.117 9	0.140 8	0.127 3
G	0.117 2	0.120 4	0.125 1	0.124 8	0.120 5	0.117 5	0.117 9	0.140 8	0.127 3
H	0.176 6	0.174 7	0.179 6	0.156 8	0.175 2	0.143 7	0.154 9	0.150 0	0.147 0
I	0.176 6	0.174 7	0.179 6	0.156 8	0.175 2	0.143 7	0.154 9	0.150 0	0.147 0

由表 9 的效率准则层评价结果可知，黄河流域及各省区 2020 和 2030 年分别以考虑了节水措施的方案 D、E 和 H、I 优于同期不考虑节水的其他方案，继 2012 年国务院实施最严格的水资源管理制度以及节水型社会建设以来，黄河流域各地区严格加强用水效率控制制度，全面推进节水型社会建设，流域的灌溉水有效利用系数、工业用水重复利用率以及管网漏损率逐步优化，到 2030 年，黄河流域各地区用水效率得到了极大提高。

3　结　论

本研究考虑资源、社会、经济、效率 4 个方面，改进了传统的仅以水质和水量作为自然资源的评价指标，再综合资源准则层的量、质、域、流 4 个维度，构建了水资源配置方案综合评价指标体系，采用基于博弈论和 DS 证据理论耦合的水资源配置评价模型，对黄河流域不同水资源配置方案进行评价，结果表明：2020 年和 2030 年分别以同时考虑节水和调

水措施的方案E和方案I为推荐方案。

本研究建立的基于资源、社会、经济、效率的水资源配置方案评价指标体系,扩充了自然资源内涵,使评价结果更加合理;将主观赋权的AHP与客观赋权的CRITIC法相结合,采用博弈论确定综合权重中的比例系数,提高了权重的准确度;引用考虑权重的DS证据理论构建水资源配置方案综合评价模型,较好地融合了各类数据信息,解决了评价过程中的信息缺失问题。总体而言,该评价结果可为不同资源禀赋及不同社会、经济、效率类型的区域水资源配置方案的遴选提供借鉴。

[参考文献]

[1] 童绍玉,周振宇,彭海英.中国水资源短缺的空间格局及缺水类型[J].生态经济,2016,32(7):168-173.
Tong S Y,Zhou Z Y,Peng H Y. Spatial pattern of scarcity of water and it's shortage types in China [J]. Ecological Economy,2016,32(7):168-173.

[2] 刘 静.我国水资源问题与经济可持续发展[J].宏观经济管理,2002(4):12-13.
Liu J. China's water resources issues and sustainable economic development [J]. Macroeconomic Management,2002(4):12-13.

[3] 王 浩,游进军.水资源合理配置研究历程与进展[J].水利学报,2008,39(10):1168-1175.
Wang H,You J J. Advancements and development course of research on water resources deployment [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(10):1168-1175.

[4] 王 浩,游进军.中国水资源配置30年[J].水利学报,2016,47(3):265-271,282.
Wang H,You J J. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):265-271,282.

[5] George B,Malano H,Davidson B,et al. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies: Ⅰ. model development [J]. Agricultural Water Management,2011, 98(5):733-746.

[6] Davidson B,Malano H,Nawarathna B,et al. The hydrological and economic impacts of changing water allocation in political regions within the peri-urban South Creek catchment in Western Sydney: Ⅰ. model development [J]. Journal of Hydrology,2013,499:339-348.

[7] George B,Malano H,Davidson B,et al. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies: Ⅱ. scenario assessment [J]. Agricultural Water Management,2011,98(5):747-758.

[8] 卢兴旺,于志民,田 杰.基于模糊BP神经网络的水资源合理配置综合评价研究[J].中国农村水利水电,2009(4):4-6.
Lu X W,Yu Z M,Tian J. Research on comprehensive evaluation of rational distribution of water resources based on fuzzy BP neural network [J]. China Rural Water and Hydropower,2009(4):4-6.

[9] 高 波,徐建新,班培莉.基于模糊优选模型的水资源配置方案评价[J].灌溉排水学报,2008,27(6):58-60.
Gao B,Xu J X,Ban P L. Evaluation of the water resource allocation schemes based on fuzzy optimization model [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(6):58-60.

[10] 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 (Natural Science Edition),2016,44(2):214-220.

[11] 余建星,蒋旭光,练继建.水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J].水利学报,2009,40(6):729-735.
Yu J X,Jiang X G,Lian J J. Comprehensive evaluation model for optimal deployment of water resources based on fuzzy theory and information entropy [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(6):729-735.

[12] 张 冰,张卫兵.基于模糊优选模型的水资源配置方案评价[J].节水灌溉,2009(6):29-31,35.
Zhang B,Zhang W B. Water resources allocation schemes evaluation based on fuzzy optimization model [J]. Water Saving Irrigation,2009(6):29-31,35.

[13] Tiri A,Belkhiri L,Mouni L. Evaluation of surface water quality for drinking purposes using fuzzy inference system [J]. Groundwater for Sustainable Development,2018,6:235-244.

[14] 杨丽莉,马细霞.武嘉灌区水资源配置方案综合评价研究[J].人民黄河,2012,34(10):83-85.
Yang L L,Ma X X. Overall merit water resources allocation scheme Wujia irrigation Area [J]. Yellow River,2012,34(10):83-85.

[15] 张成凤,粟晓玲,蔡焕杰.基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究[J].自然资源学报,2017,32(6):1053-1063.
Zhang C F,Su X L,Cai H J. Harmony evaluation of water resources allocation system in Yuyang area based on IAHP [J]. Journal of Natural Resources,2017,32(6):1053-1063.

[16] 张 阳,张 橙.基于TOPSIS-灰色关联度分析的水资源配置方案综合评价[J].统计与决策,2017(18):62-65.
Zhang Y,Zhang C. Comprehensive evaluation of water resources allocation scheme based on TOPSIS-gray correlation analysis [J]. Statistics & Decision,2017(18):62-65.

[17] Li Z,Zhang Q,Liao H. Efficient-equitable-ecological evaluation of regional water resource coordination considering both visible and virtual water [J]. Omega,2019,83:223-235.

[18] 沈丰菊,张克强,李军幸,等.基于模糊积分模型的农村生活污水处理模式综合评价方法[J].农业工程学报,2014,30(15):272-280.
Shen F J,Zhang K Q,Li J X,et al. Evaluation method for en-

gineering technology of rural domestic sewage treatment based on fuzzy integral model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 272-280.

[19] 王建华，姜大川，肖伟华，等. 水资源承载力理论基础探析：定义内涵与科学问题 [J]. 水利学报，2017，48(12)：1399-1409.
Wang J H, Jiang D C, Xiao W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409.

[20] 郑方丹，姜久春，孙丙香，等. 基于筛选配组应用的动力电池综合性能评价方法研究 [J]. 系统工程理论与实践，2015，35(2)：528-536.
Zheng F D, Jiang J C, Sun B X, et al. Study of synthesized performance evaluation method of powerbattery based on the target of matching battery packs [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(2): 528-536.

[21] 韩宇平，阮本清，解建仓，等. 物元模型及其在区域水资源综合评判中的应用 [J]. 中国农业大学学报，2003，8(1)：31-36.
Han Y P, Ruan B Q, Xie J C, et al. Matter elements model and its application to regional water resources synthesize assessment [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(1): 31-36.

[22] 王好芳，董增川. 区域水资源可持续开发评价的层次分析法 [J]. 水力发电，2002 (7)：12-14，76.
Wang H F, Dong Z C. Application of analytic hierarchy process (AHP) method in regional water resources sustainable development evaluation [J]. Water Power, 2002(7): 12-14, 76.

[23] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method [J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

[24] Rostamzadeh R, Ghorabaee M K, Govindan, K, et al. Evaluation of sustainable supply chain risk management using an integrated fuzzy TOPSIS-CRITIC approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 651-669.

[25] 李慧伶，王修贵，崔远来，等. 灌区运行状况综合评价的方法研究 [J]. 水科学进展，2006，17(4)：543-548.
Li H L, Wang X G, Cui Y L, et al. Comprehensive evaluation methods irrigation district [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 543-548.

[26] 费良军，王锦辉，王光社，等. 基于改进熵权-G1-博弈论法的灌区运行状况综合评价 [J]. 排灌机械工程学报，2015，33(10)：895-900.
Fei L J, Wang J H, Wang G S, et al. Comprehensive evaluation of irrigation district operational status based on improved entropy weight-G1-game theory method [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(10): 895-900.

[27] 迟道才，马　涛，李　松. 基于博弈论的可拓评价方法在灌区运行状况评价中的应用 [J]. 农业工程学报，2008，24(8)：36-39.
Chi D C, Ma T, Li S. Application of extension assessment method based on game theory to evaluate the running condition of irrigation areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 36-39.

[28] 刘　东，龚方华，付　强，等. 基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA-TOPSIS 评价模型 [J]. 农业机械学报，2017，48(5)：218-226.
Liu D, Gong F H, Fu Q, et al. Evaluation model of irrigation water use efficiency based on game theory and GRA- TOPSIS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 218-226.

[29] 郭燕红，邵东国，刘玉龙，等. 工程建设效果后评价博弈论集对分析模型的建立与应用 [J]. 农业工程学报，2015，31(9)：5-12.
Guo Y H, Shao D G, Liu Y L, et al. Establishment and application of set pair analysis model based on game theory for post-assessment of project construction effectiveness [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 5-12.

[30] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38: 325-339.

[31] Shafer G. A mathematical theory of evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 5-27.

[32] 董前进，陈森林，张柳波，等. 基于 D-S 证据理论的水资源合理配置方案综合评价 [J]. 数学的实践与认识，2011，41(23)：26-30.
Dong Q J, Chen S L, Zhang L B, et al. Comprehensive evaluation of water resources allocation alternatives based on evidence theory [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(23): 26-30.

[33] 刘　勤，严昌荣，赵彩霞，等. 黄河流域日潜在蒸散量变化及气象敏感要素分析 [J]. 农业工程学报，2014，30(17)：157-166，342.
Liu Q, Yan C R, Zhao C X, et al. Changes of daily potential evapotranspiration and analysis of its sensitivity coefficients to key climatic variables in Yellow River basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(17): 157-166, 342.

[34] 彭少明，黄　强，刘　涵，等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究 [J]. 干旱区资源与环境，2007，21(6)：97-102.
Peng S M, Huang Q, Liu H, et al. Sustainable utilization model of water resources in main stream of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(6): 97-102.

[35] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划 [M]. 郑州：黄河水利出版社，2013：106-128.
Yellow River Conservancy Commission of Water Resources. Comprehensive planning of the Yellow River Basin (2012—2030) [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2013: 106-128.