



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.009

邱庆泰, 王刚, 王维, 等. 基于可变集的区域水资源全要素配置方案评价[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 55-61. QIU Qing tai, WANG Gang, WANG Wei, et al. Evaluation of total factor allocation scheme of regional water resources based on the variable set[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 55-61. (in Chinese)

基于可变集的区域水资源全要素配置方案评价

邱庆泰¹, 王刚¹, 王维¹, 冯忠伦¹, 赵天宇², 林洪孝¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 济南 250000)

摘要: 传统的区域水资源配置以水量配置为主, 存在的指标单一、评价重量轻质、忽视水质潜在效应及缺乏水质调控方案等问题; 以统筹水资源、社会经济、生态环境三大系统的水资源全要素配置为指导, 通过水量水质联合配置得出配置方案集; 将可变模糊清晰集应用于方案集评价, 构建了基于指标区间优选法的评价模型, 该模型包括水资源配置中指标级别区间的构建及评价。经山东省邹城市 2030 年水资源配置方案实证分析表明: 山东省邹城市 2030 年水资源配置方案集级别特征值区间为[2.5, 3.5], 水资源可持续利用程度处于良好与及格之间, 评价模型实用性成果显著。

关键词: 水量水质; 全要素优化; 可变集; 区间; 级别

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0055-07

Evaluation of total factor allocation scheme of regional water resources based on the variable set

QIU Qing tai¹, WANG Gang¹, WANG Wei¹, FENG Zhong lun¹, ZHAO Tian yu², LIN Hong xiao¹

(1. Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. Construction Administration Company of Eastern Project of South to North Water Diversion, Jinan 250000, China)

Abstract: The water resources allocation based on water quantity has some problems, for example, selecting single index, weight of the evaluation results, neglecting the potential effect of water quality and lack of water quality controlling program. So, this paper constructed the index system of water resources allocation including water resources, social economy and ecological environment; The configuration scheme set was obtained by the combination of water quantity and water quality; The evaluation model was structured by variable set in order to take into account the fuzzy variation of each factor. This paper used the interval optimization method to divide the leading indicators into five levels and construct the sequence of each indicators, and evaluate the water resources allocating scheme at Zoucheng city in 2030. The results showed that the level of water resources allocating scheme in Zoucheng city was [2.5, 3.5]. The sustainable utilization level of water resources was between good and pass, and the evaluation proved the significant applicability of the model.

Key words: water quantity and quality; total factor optimization; variable set; interval; rank

区域水资源合理配置即在区域内遵循一定原则、按照相应准则, 通过各种措施合理调配区域内的可用水资源。随着水资源评价认识的发展, 我国现

代水资源配置先后经过基于水资源广义属性的水资源配置、基于区域宏观经济的水资源配置^[1-2]、基于生态耗水的水资源配置、基于 ET 的水资源整体配

收稿日期: 2015-12-25 修回日期: 2016-08-03 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0933.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41202174); 教育部博士点基金资助(20123702120020)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41202174); Doctoral Program Foundation of Ministry of Education of China under Grant(20123702120020)

作者简介: 邱庆泰(1990), 男, 山东东阿人, 主要从事水资源开发利用及管理方面研究。E-mail: 498911412@qq.com

通讯作者: 林洪孝(1959), 男, 重庆城口人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源开发利用及管理方面研究。E-mail: linhx@sdau.edu.cn

置。当前基于水量的水资源配置研究已日趋成熟。唐德善等^[2]以经济、社会和环境效益为目标建立流域水资源优化配置模型,用阶梯分析法求解;邵东国等^[3]以多种机制约束下水资源净效益最大化为目标,并通过熵变关系判别水资源配置合理性;孙月峰等^[4]构建了基于混合遗传算法的区域大系统多目标水资源优化配置模型,计算求得不同保证率情况下的生活和生态需水情况;周祖昊、桑学锋等^[5-7]基于生态水文、针对“真实节水”探讨了基于广义 ET 的区域水资源与水环境综合管理规划,并在天津市适用得出的方案进行定量评价,优选出基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划推荐方案;魏传江、张守平等^[8-12]提出水资源全要素优化配置,并以水量水质联合配置为方法得出区域合理配置方案,然而对配置方案整体评价需要进一步研究。

对水资源综合配置方案来说,影响方案本身的指标因素多,各要素变动区间相互影响且相互影响程度模糊不清晰,无法定量表示;本文选用基于对立统一理论的可变模糊清晰集^[13-18],分析全要素配置方案中的水资源系统、社会经济系统和生态环境系统三大系统,结合方案评价中各要素之间的清晰关系及各要素指标区间的模糊关系,建立以水资源、社会经济及生态环境系统可持续性最优为目标的方案评价模型,并用可变集指标区间优选法求解,明确了方案本身协调程度及方案集整体趋势,促进了可变集指标区间优选法在选择最优水资源配置方案中的应用。

1 研究方法

1.1 水资源全要素优化配置模型

1.1.1 水资源全要素配置指标控制

水资源全要素优化配置以水资源天然和人工侧支循环演化二元模式为基础,统筹水资源系统、经济社会系统和生态环境系统,以水量与水质联合配置为方法,控制社会经济与生态环境合适的用水比例,控制取耗水总量与污染物排放总量,对区域各用水部门进行水量、水质联合配置,提高用水比例,合理抑制需求,保障有效供给,实现水资源可持续利用。

(1) 水资源系统调控指标。水资源系统调控主要为区域内水资源利用现状分析、规划中水利工程对区域供需水格局的改善、以及未来水资源系统整体水平,调控程度主要体现在区域人均水资源量、区域水资源开发利用程度、区域水资源总量水量平衡方程、区域分质供水保障率等要素。

(2) 社会经济耗水调控指标。社会经济调控指标主要体现在区域人畜饮水的完全保障、区域经济发展、区域万元 GDP 用水量、区域经济发展的缺水程度、区域产业升级带来的耗水模式的改变、区域水资源配置的总体投入(工程和非工程)等。

(3) 生态调控指标。确定生态用水比例主要分析流域当前的水资源开发利用形势和生态环境演变情势,分析当前社会经济的产业特点与耗水结构,以及未来社会经济产业方式与耗水结构的改进,分析得出合理生态用水比例及其阈值。根据区域实际情况,确保未来水平年整体生态状况不低于天然生态保护的最低要求,维护生态系统圈层结构合理稳定。主要指标为满足河道最小生态基流、确保当地生态系统生物多样性的最小需水量,各水平年生态用水比例保持在水资源可持续利用的最小比例之上。

(4) 环境调控指标。点源及非点源污染的排放必须满足水功能区水质目标和水域纳污能力,满足水资源合理开发和有效保护的需求。主要指标水功能区水质达标率,污废水的排放率和处理率。

1.1.2 水资源全要素优化配置模型

以水量水质联合配置为方法对三大系统进行优化配置:以供水单元为核心计算水资源供需平衡,以流域水资源分区水量平衡及河流生态径流量为核心分析水资源耗水平衡及生态用水保证率,以河流纳污能力为核心分析水功能区达标率。

(1) 供需平衡分析。供需平衡分析基于水资源分区节点、水传输系统,根据水量平衡原理,建立供需水系统各个控制节点、供需水节点,在目标函数最值下计算单元节点平衡方程和约束方程,求解最优化。目标函数程如下:

$$\text{优化目标函数: } \text{Max OBJ} = -\text{OBJ}_1 C_1 - \text{OBJ}_2 C_2 + \text{OBJ}_3 C_3 + \text{OBJ}_4 C_4 - \text{OBJ}_5 C_5 \quad (1)$$

$$\text{水库水量平衡方程: } \sum_{I \in I_i} q_{I_k} - \sum_{O_i} q_k = \Delta V_i \quad i \in R \quad (2)$$

$$\text{地下水平衡方程: } Q_s + Q_{ci} - \sum_{u \in U} g_{2u} + Q_a + Q_w \quad (3)$$

$$\text{计算节点水量平衡方程: } \sum_{I \in I_i} (q_{(I+1)} - q_I/n_I) = 0 \quad i \in N \quad (4)$$

$$\text{供需平衡: } w d_{ui} - \left[\sum_{I \in I_i} q_{I2u} + g_{2u} \right] = w d_{ui} - S_{ui} = m_{ui} \quad i \in Z \quad u \in U \quad (5)$$

式中: Max OBJ 为最优化模型值; OBJ_i 分别为供水净效益、供水优先序、供水水源优先序、水库损失水量最小、水质最小影响; C_i 分别为各目标权重; R 为水库集合; N 为节点集合; Z 为计算分区集合; U 为用水行业; O 为节点下游集合; I 为节点上游集合; q

为连线水量; ΔV 为水库时段蓄变量; Q_s 为入渗补给量; Q_a 为地下径流侧入量; Q_e 为蒸发蒸腾量; Q_w 为地下径测流量; g_{2u} 为各行业地下水用水量; n_l 为 l 段管网漏失率; $w d_u$ 为各行业需水量; q_{2u} 为非地下水供水; S_{ui} 为各行业供水量; m_{ui} 为缺水率。

(2)耗水平衡分析。耗水平衡以水量平衡为方法,对水资源分区的产水量、调入和调出水量、出境和入境水量、社会经济耗水量、生态耗水量及水资源分区间水传输关系构成评价模型。目标函数如下。

$$W = WL + INW + DIW - DOW \quad (6)$$

$$W = ECW + EYW \quad (7)$$

$$\mu = \sum_j \alpha_j \left[\frac{M_{1j} + M_{2j} + \dots + M_{ij}}{w_j} \right] \quad (8)$$

$$E = Dc + Rc + Ic + Ac + E_{oi} + E_{oo} \quad (9)$$

式中: W 为流域区水资源可利用量; WL 为当地水资源可利用量; INW 为入境水量; DIW 为调入水量; ECW 为社会经济用水量; EYW 为生态用水量; DOW 为调出水量; μ 为分质供水保障率; α_j 为各用水单位权重; w_j 为各用水单位需水量; M_{ij} 为用水单位各类用水量。 E 为区域耗水量; Dc 为生活耗水量; Rc 为农业耗水量; Ic 为工业耗水量; Ac 为第三产业耗水量; E_{oi} 为城镇生态耗水量; E_{oo} 为生态耗水量。

(3)水质平衡分析。水质平衡分析是以水功能区的水质目标及纳污能力为依据,对规划水平年污染物进行总量控制,对每个河段污染物降解能力及纳污能力分析,控制排污口污染物排放量及排放种类。目标函数如下:

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + Q \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - K A C + w \quad (10)$$

$$C_s = C_{n-1} \exp(-K_n L_n / u_n) + W_n / Q_n \exp(-K_n L_n / 2u_n) \quad (11)$$

$$W = \sum_{i=1} W_i \quad (12)$$

式中: Q 为河段流量; C 为污染物; A 为断面面积; K 为污染物综合衰减系数; E_x 为纵向分散系数及分子紊动扩散系数之和; w 为源或者汇; C_s 为河段下界污染物浓度; C_{n-1} 为河段上界污染物浓度; L 为河段长度; u_n 为河段流速; W 为污染物容纳量。

在水资源全要素配置过程中,三大系统的各要素之间相互影响程度模糊不定,如经济增长速率与生态需水,在水资源量一定的情况下,随着经济增速增大,区域经济需水量增大,势必会占用一部分生态需水,但生态需水缩减量无法直观得到,只能以区间形式表现并通过变化区间来映射模糊影响程度。因

此选取可变模糊清晰集对具有指标清晰及影响区间模糊的方案进行分析,并通过可变集指标区间优选法计算方案级别特征值。

1.2 基于对立统一的指标区间可变集优选法

将水资源全要素配置方案中各指标作为评价对象,基于可变集对立统一定理,采用指标区间优选法计算出各方案级别特征值,反映方案本身合理程度,即方案优劣等级。

1.2.1 可变集的对立统一定理

设 U 为论域, U 中的任一元素 u 的对立模糊属性为 A 与 A^c , u 在连续统确定的一对对立测度值 $\mu_A(u)$ 和 $\mu_{A^c}(u)$ 即其相对隶属度,且 $\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1$ 。

记 u 的变化为 $C(u)$, 对对立事物的概念、现象来说,其变化前后始终是

$$\mu_A(C(u)) + \mu_{A^c}(C(u)) = 1 \quad (13)$$

1.2.2 可变集的水资源指标区间优选决策原理与模型

设优选方案集为: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} = \{u_j\}$ ($j = 1, 2, \dots, n$); $X = (x_j)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为方案 j 各指标特征值; X 为方案集; x_j 为第 j 个方案指标 i 的取值; 方案集单个指标 i 区间范围确定即: $I_j = [\{\max(a_{ij}), \{\min(b_{ij})\}]$ 或 $I_j = [\{\min(a_{ij}), \{\max(b_{ij})\}]$, 式中 I_j 为指标 i 在 j 个方案中优选区间, 优选区间上下限为方案集中指标 i 极值; 或取指标在国际公认优劣程度的区间范围。

根据可变集对立统一的事物相对差异度演变,将优选区间 I_j 分为 c 个等级区间, c 个级别的指标特征值区间矩阵为: $I = [a_{ih}, b_{ih}]$ ($h = 1, 2, \dots, c$), 其中 a_{ih}, b_{ih} 为指标 i 在 h 级别标准值区间的上下限; 根据可变集对立统一定理,在级别 h 特征值区间中必定存在指标 i 的级别 h 与级别 $h+1$ 的渐变式质变点,质变点两侧对应两级别相对对立,由公式(1)知, $\mu_{A^c}(u) = 1$ 即对应级别 h 隶属度为 1 的点 k_{ih} 为

$$K_{ih} = \frac{c-h}{c-1} a_{ih} + \frac{h-1}{c-1} b_{ih} \quad (14)$$

式中: k_{ih} 为优选区间内指标 i 对应 h 级别隶属度为 1 的点; c 为指标评价级别; 其他同上。

由式(14)与矩阵 I 得矩阵 K , $K = [k_{ih}, b_{ih}]$, 若方案集指标特征值 x_j 在矩阵 K 相邻两级 h 与 $(h+1)$ 区间, 则 x_j 对 h 级相对隶属度计算:

$$\mu_h(u_j) = 0.5 \left[1 + \frac{b_{ih} - x_{ij}}{b_{ih} - k_{ih}} \right] \quad x_j \in [k_{ih}, b_{ih}] \quad (15)$$

$$\mu_h(u_j) = 0.5 \left[1 + \frac{b_h - x_j}{b_{ih} - k_{ih}} \right] \quad x_j \in [k_h, b_{(h+1)}] \quad (16)$$

式中: $\mu_j(u_j)$ 为方案 j 指标 i 对级别 h 的相对隶属度; 其他同上。且 x_j 对小于 h 级、大于 $(h+1)$ 级相对隶属度均为 0。

得方案指标 x_j 相对隶属度向量式, 同理得 u_i 各指标对各级的相对隶属度矩阵 $\mu_h(u_j)$ 。

计算得各方案对级别 h 的综合相对隶属度向量:

$$V_h(u_j) = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(1 - \mu_h(u_j))]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i \mu_h(u_j)]^p}} \quad (17)$$

式中: $V_h(u_j)$ 为方案 j 各指标对级别 h 的相对隶属度; w_i 为指标 i 的权重, 且 $w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1$; $\alpha = 1$, p 为距离参数, 本文取海明距离 $p = 1^{[19]}$ 得方案对级别 h 综合相对隶属度线性模型, 即:

$$V_h(u_j) = \sum_{i=1}^m w_i \mu_h(u_j) \quad (18)$$

计算方案 j 对应级别特征值:

$$H(u_j) = \sum_{h=1}^c v_h^0(u_j) \cdot h \quad (19)$$

式中: $v_h^0(u_j)$ 为 $(v_h(u_j))$ 的归一化向量。

对每个决策方案 u_j 进行如上计算, 得到各方案级别特征值, 且方案级别特征值越小方案越优。可变集评价在水库联调、水质评价和干旱评价等方面应用较多, 如水库联合调度研究、三峡库区环境污染评价、区域干旱分区研究等。本文将此评价方法应用于水资源全要素配置方案中, 针对全要素优化配置涵盖的水资源系统、经济社会系统和生态环境系统之间的相互影响问题, 选取三大系统的主要调控指标作为评价要素, 通过各指标的区间变化来映射三大系统模糊制约关系, 计算各配置方案级别特征值并分析成因。

2 实例应用

2.1 研究区概况与水资源配置方案

邹城市位于鲁西南腹地, 地处沂蒙山区西部边缘, 属华北地台型, 地形东高西底, 市内多年平均降水量为 706.4 mm, 区域 50%、75%、95% 保证率下降水量为 728.4 mm、570.4 mm、356.0 mm, 境内河流多属雨源型山溪性河流。邹城市多年平均水资源量为 53.732 亿 m^3 , 其中地表水资源量为 25.112 亿 m^3 , 人均水资源可利用量 464 m^3 ^[19], 不足全国平均水平 1/4, 水资源利用率达 55%。

2010 年邹城市实际供水量总计为 29.727

亿 m^3 , 其中地表水、地下水(浅层水)和其他水源供水量分别为 12.219 亿 m^3 、16.868 亿 m^3 、6.40 亿 m^3 , 参照文献[20]分析现状年经济社会实际情况得出的需水量 29.130.9 亿 m^3 , 相差率为 0.02, 需水计算模型可用。根据邹城市社会经济发展和水利工程开发等情况配置多个水资源配置方案, 遵循水资源配置的需水代表性、供水代表性及工程布局代表性三大准则, 分别以水资源系统、社会经济系统、生态环境系统各自最优配置, 结合高中低三个发展模式^[21], 以区域水量水质^[22]联合配置相互交叉得出 27 个水资源配置方案^[23], 见表 1、图 1。

表 1 2030 年邹城市水资源供需配置指导

Tab. 1 Configuration for supply and demand of water resource in Zoucheng in 2030

方案	方案 1- 方案 27
	低 低 低
社会经济发展	中 中 中
	高 高 高
	现状供水、中水回用
水资源系统	客水及新建工程新增供水
	强化节水

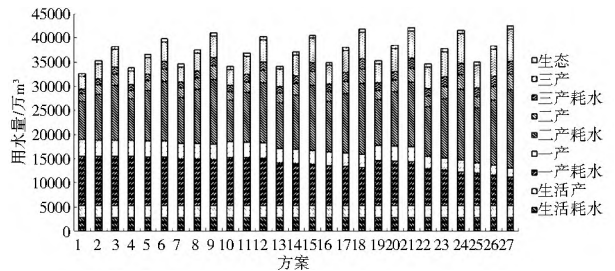


图 1 2030 年邹城市水资源配置

Fig. 1 Network chart generalization of Zoucheng in 2030

本文采用一维水质模型^[23]对水功能区主要河流断面水质进行评价, 对主要承污河流分段计算不同断面污染物浓度, 采用上下游分配法^[9], 根据同一河段上下游断面间的浓度差、河流段污水排放量、设计流量、河流段水功能区水质要求计算河流段最大纳污能力。邹城市按水质标准区划水功能区(采取“就高”原则)主要分为白马河水系、泗河水系渔业用水区、大城河水系、北沙河河水系、界河水系、浚河水系, 鉴于邹城市生产生活区域主要集中在中西部, 选取作为主要排污的白马河作为分析水功能区纳污能力计算河段, 主要控制断面 COD 最大纳污能力分别为 354.2、1019.5、2882.3、423.6、513.2 kg/d; 氨氮为 17.7、50.9、48.0、21.2、25.7 kg/d, 至 2030 年邹城市设计污水处理量为 9.490 亿 m^3 , 污水排放最大方案下污水入河量见表 2, 水功能区纳污超限

一般水平,分析原因:(1)邹城市水资源相对紧缺,人均水资源量少,水资源方案集缺水率范围区间为 3%~16.5%;(2)邹城市用水结构较为合理,但社会经济中农业用水水平不高,灌溉水利用系数较低,现状年农业用水比重为 66.9%,其中耗水比重为 57.1%,方案集中农业用水耗水比重控制在 22%~42% 范围内;(3)邹城市工业用水水平较高,工业以高耗水的能源型产业为主,现状年工业耗水率高达 85% 以上,出现用水量不大耗水量较大的现象,同时高耗水造成方案中生态需水量减少。

由图 2、图 3 知,对应水资源系统最优、生态环境最优、社会经济最优的方案 19、方案 1、方案 27 级别特征值分别为 2.72、3.06、3.34,三大系统各自最优的三个方案中方案 19 最接近方案 25,表明:在邹城市后期规划中单一考虑三大系统都不能得到最优方案,而应统筹三大系统预测远期规划;以水资源利用现状为依据的远期预测规划中,分别以三大系统最优为侧重点得出的方案中水资源系统最优方案最接近最优方案,即后期规划落脚点应选取在水资源系统,其次是生态系统,最后是社会系统。

3 结论

(1)将可变集理论应用在区域水资源全要素配置上,建立以方案典型性要素为评价目标的多目标多级系统评价模型,既统筹了全要素配置的三大系统又分析了配置方案各指标之间的模糊变化,同时结合熵值法确定的要素权重,能定量的评价出配置方案集各方案级别程度、方案集的级别稳定区间,以及区域水资源可持续利用程度。

(2)根据可变集指标区间优选法在山东省邹城市水资源全要素配置方案上的应用,将每个方案在水资源系统、社会经济系统和生态环境系统进行定量评价,从 27 个配置方案中选出最优方案并与三大系统各自最优方案进行比较,得出邹城市后期规划主要落脚点为水资源系统。

(3)不同的区域由于三大系统相互影响关系的不同,得出的配置方案不同,方案集的指标优选区间也随之变化,根据三大系统分别最优化方案的级别特征值可准确的反映出区域配置的着重点,为区域水资源配置方案优选提供决策依据。

参考文献(References):

[1] 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 Hao, YOU Jin jun. Advancements and development course of research on water re-

sources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese))

- [2] 唐德善.黄河流域多目标优化配水模型[J].河海大学学报,1994,22(1):46-52.(TANG De shan. A model of multi objective optimal allocation of water resources in Yellow River Basin[J]. Journal of Hohai University, 1994, 22(1): 46-52. (in Chinese))
- [3] 邵东国,贺新春,黄显峰,沈新平.基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J].水利学报,2005,36(9):1050-1056.(SHAO Dong guo, HE Xir chun, HUANG Xiarr feng, et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1050-1056. (in Chinese))
- [4] 孙月峰,张胜红,王晓玲,等.基于混合遗传算法的区域大系统多目标水资源优化配置[J].模型系统工程理论与实践,2009,29(1):139-144.(SUN Yue feng, ZHANG Sheng hong, WANG Xia o ling, et al. Multi objective optimization of regional water resources based on mixed genetic algorithm[J]. System s Engineering Theory & Practice, 2009, 29(1): 139-144. (in Chinese))
- [5] 周祖昊,王浩,秦大庸,等.基于广义 ET 的区域水资源与水环境综合规划研究Ⅰ:理论[J].水利学报,2009,40(9):1025-1032.(ZHOU Zu hao, WANG Hao, WANG Xia o ling, et al. Comprehensive water resources and environment planning based on generalize d evaporation transpiration water consumption control I. Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1025-1032. (in Chinese))
- [6] 桑学锋,周祖昊,秦大庸,等.基于广义 ET 的区域水资源与水环境综合规划研究Ⅱ:模型[J].水利学报,2009,40(10):1153-1161.(SANG Xue feng, ZHOU Zu hao, QIN Da yong. Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation transpiration water consumption control Ⅱ. Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1153-1161. (in Chinese))
- [7] 桑学锋,秦大庸,周祖昊,等.基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划研究Ⅲ:应用[J].水利学报,2009,40(12):1409-1415.(SANG Xue feng, QIN Da yong, ZHOU Zu hao, et al. Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation transpiration water consumption control Ⅲ: Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1409-1415. (in Chinese))
- [8] 魏传江,韩俊山,韩素华.流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范[M].北京:中国水利水电出版社,2012.(WEI Chuan jiang, HAN Jun shan, HAN Su hua. Basin/region water key technologies and demonstration of total factor optimal allocation [M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))
- [9] 康爱卿,魏传江,谢新民,等.水资源全要素配置框架下的三次平衡分析理论研究与应用[J].北京:中国水利水电科学研究院报,2011,9(3):161-167.(KANG Ai qing, WEI Chuan jiang, XIE Xir min, et al. Research and application on three equilibrium law under the framework of water resources entire elements option allocation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(3): 161-167. (in Chinese))

- [10] 付意成,魏传江,王瑞年,等.水量水质联合调控模型及其应用[J].水电能源科学,2009,27(2):31-35.(FU Yi cheng, WEI Chuang jiang, WANG Rui nian, et al. Water quantity and quality joint regulation model and its application[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 31-35. (in Chinese))
- [11] 张守平,魏传江,王浩,等.流域/区域水量水质联合配置研究Ⅱ:理论方法[J].水利学报,2014,45(7):757-766.(ZHANG Shou ping, WEI Chuang jiang, WANG Hao, et al. Basin/region water quality and quantity allocation Ⅱ. Theory and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 757-766. (in Chinese))
- [12] 张守平,魏传江,王浩,等,周翔南.流域/区域水量水质联合配置研究Ⅰ:实例应用[J].水利学报,2014,45(8):938-949.(ZHANG Shou ping, WEI Chuang jiang, WANG Hao, et al. Basin/region water quality and quantity allocation Ⅰ. Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 938-949. (in Chinese))
- [13] 陈守煜.基于可变模糊集的辩证法三大规律数学定理及其应用[J].大连理工大学学报,2010,(5):838-844.(CHEN Shou yu. Three mathematical theorems of dialectics based on variable fuzzy sets and their application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, (5): 838-844. (in Chinese))
- [14] 陈守煜.可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法[J].水利学报,2012,43(9):1066-1074.(CHEN Shou yu. Variable sets and the theorem and method of optimal decision making for water resource system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1066-1074. (in Chinese))
- [15] 陈守煜.可变模糊集理论与模型及其应用[M].大连:大连理工大学出版社,2009.(CHEN Shou yu. Theory and model of Variable fuzzy sets and its application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [16] 陈守煜.水资源系统可变集评价原理与方法[J].水利学报,2013,44(2):134-142.(CHEN Shou yu. Variable sets assessment theory and method of water resource system[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2013, 44(2): 134-142. (in Chinese))
- [17] 雷江群,黄强,王义民,等.基于可变模糊评价法的渭河流域综合干旱分区研究[J].水利学报,2014,45(5):574-584.(LEI Jiang qun, HUANG Qiang, WANG Yi min, et al. Variable fuzzy evaluation on comprehensive divisions of drought in the Wei River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 574-584. (in Chinese))
- [18] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.(CHEN Shou yu. Theories and Methods of Variable Fuzzy Sets in Water Resources and Flood Control System[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [19] 邹城市水利局.邹城市水资源公报[R].2006-2010.(Zoucheng Water Conservancy Bureau. Zoucheng Water Resources Bulletin[R]. 2006-2010. (in Chinese))
- [20] 袁娜,宋云峰,王雅欣,等.基于灰色动态模型群的济宁市需水量预测[J].水电能源科学,2014,32(7):33-36.(YUAN Na, SONG Yun feng, WANG Ya xin, et al. Water demand forecasting of Jining city based on gray dynamic model groups[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 33-36. (in Chinese))
- [21] 周文,赵果庆.中国GDP增长与CPI:关系、均衡与“十二五”预期目标调控[J].经济研究,2012,5:4-17.(HOU Wen, ZHAO Guo qing. China's GDP Growth and CPI: Relationship, Equilibrium and Target Control for the 12th Five Year Plan[J]. Economic Research, 2012, 5: 4-17. (in Chinese))
- [22] 刘晓东,华祖林,谢增芳,等.一维河流水质模型多参数识别的反演优化通用算法[J].水力发电学报,2012(4):122-127.(LIU Xiao dong, HUA Zu lin, XIE Zeng fang, et al. General inversion optimization algorithm for multi parameter identification of 1D river water quality model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012(4): 122-127. (in Chinese))
- [23] 林洪孝,冯忠伦,邱庆泰,等.邹城市水资源综合规划[R].泰安:山东农业大学,2013.LIN Hong xiao, FENG Zhong lun, QIU Qing tai, et al. Zoucheng Water Resources Integrative Planning[R]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [25] 余建星,蒋旭光,连继建.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 Jian xing, JIANG Xu guang, LIAN Ji jian. 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. (in Chinese))