

集对分析在结构水资源学方法中的应用进展

金菊良^{1,2},周亮广^{1,2},吴成国^{1,2},周戎星³,崔毅^{1,2},蒋尚明^{1,4,5}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009;2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所,安徽 合肥 230009; 3. 安徽建筑大学环境与能源工程学院,安徽 合肥 230601; 4. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,安徽 合肥 230088; 5. 安徽省水科学与智慧水利重点实验室,安徽 蚌埠 233000)

摘要:为深入揭示集对分析在结构水资源学方法中的应用特点,并展望其主要发展趋势,结合现有研究成果,基于关系结构的方法论视角,归纳提出了由研究对象、研究变量、研究目标构成的结构水资源学方法系统三要素结构原理(简称三元结构原理)。结合该原理,系统阐述了集对分析在水资源系统建模、优化、识别、模拟、预测、评价、决策、推理等结构水资源学方法中的应用进展,指出集对分析在描述和处理研究变量与研究目标之间的不确定性论证关系方面具有明显优势。其中,前7种方法的实现过程反映了研究对象、研究变量、研究目标之间的信息传递,而推理方法的实现过程反映了论据、论证和结论关系之间的信息传递;与前7种方法相比,水资源系统推理方法的抽象性和复杂性层次更高。采用不确定性形成过程的物理成因分析与定量计算相结合的研究途径,深入开展更加系统化、更具开拓性的水资源集对分析方法探索是未来的重要发展趋势。

关键词:集对分析;结构水资源学方法;研究方法论;亚里士多德三段论;三元结构原理

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0180-16

Application progress of set pair analysis in structural water resources methodology//JIN Juliang^{1,2}, ZHOU Lianguang^{1,2}, WU Chengguo^{1,2}, ZHOU Rongxing³, CUI Yi^{1,2}, JIANG Shangming^{1,4,5} (1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resource and Environmental System Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601; 4. Huaihe River Conservancy Commission Water Conservancy Science Research Institute, Ministry of Water Resources, Anhui Province, Hefei 230088, China; 5. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Intelligent Water Conservancy, Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to deeply reveal the application characteristics of set pair analysis in structural water resources methodology and look forward to its main development trends, combined with existing research results, based on the methodological perspective of relational structure, a three-element structural principle of structural water resources methodology system consisting of research object, research variable, and research objective (abbreviated as the Ternary Structure Principle) was summarized and proposed. Based on the principle, the application progress of ensemble analysis in modeling, optimization, identification, simulation, prediction, evaluation, decision-making, reasoning and other methods of structural water resources methodology was systematically expounded. It is pointed out that set pair analysis had obvious advantages in describing and handling the uncertain argumentation relationship between research variables and research objectives. The implementation process of the first seven methods reflects the information transmission between the research object, research variables, and research objectives, while the implementation process of the inference method reflects the information transmission between the evidence, argumentation, and conclusion relationship. Compared with the first seven methods, the abstraction and complexity level of the water resources system inference method are higher. The research approach of combining physical cause analysis of uncertainty formation process with quantitative calculation is an important development trend in the future to explore more systematic and pioneering water resource set pair analysis methods.

Key words: set pair analysis; structural water resources methodology; research methodology; Aristotle's syllogism; the Ternary Structure Principle

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240223, 52409001);安徽省自然科学基金项目(2208085US03, 2408085ME135)

作者简介:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事结构水资源学研究。E-mail:JINJL66@126.com

通信作者:吴成国(1982—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:wule9825@163.com

自然界各事物内部及事物之间普遍存在联系,结构水资源学聚焦于水资源复杂系统的结构特征^[1],是从关注水资源系统问题处理方法的水资源系统工程向关注水资源系统问题处理过程的物理成因分析与定量计算、知行合一方向发展的一门水资源学新分支学科,与随机水文学、模糊水文学都属于技术科学层次^[2]。现有的结构水资源学方法主要是面向水资源问题的物理成因过程,应用水资源学、系统工程^[3]、计算智能^[4]处理各种水资源复杂系统问题^[5-6]所形成的各种方法,目前主要包括面向问题解析的水资源系统建模、优化、识别、模拟、预测、评价、决策、推理等方法^[7-8]。水资源系统问题的复杂性主要源于系统输入、转换或输出中的不确定性^[9-10]。由赵克勤等^[11-12]提出的集对分析是处理辩证不确定性关系的新颖智能分析理论,自1998年提出以来逐渐被应用于水资源评价、预测、决策等问题中,取得了一系列进展,显著推动了结构水资源学科的产生和发展,形成了水资源集对分析研究方向^[13-15],与随机分析、模糊集分析、灰色系统理论、未确知理论一起成为目前五大水资源不确定性分析方法^[16]。水资源集对分析以具有丰枯等对立关系^[17-18]的两集合构建集对,基于一分为三原理^[19]从同一、差异、对立(简称同异反)3个方面系统、定量地全面分析集对的联系程度;采用集对分析联系数中的差异项表征集对系统中的不确定性,用同异反3类模糊关系^[11,16]组成的联系数定量刻画集对确定性和不确定性关系,利用联系数的减法集对势、偏联系数等定量估计联系数值及其发展趋势并用于实证分析,形成了一套“客观承认-系统描述-定量刻画-具体分析-应用验证”^[12]戴明循环式复杂系统不确定性分析方法论,从而分析集对系统中不确定性与确定性之间的联系、转化,应用成对原理描述水资源集对系统确定性、不确定性相统一的结构特征,并分析其演化规律^[20-21]。集对分析是一种新颖的水资源不确定性分析理论,在水资源预测、评价、决策等问题中逐渐得到广泛应用^[15-16,22],进一步增强了结构水资源学方法^[2,23]在处理水资源系统不确定性问题的适用性。

由于集对分析在结构水资源学方法中的应用时间较短,其方法论基础尚为薄弱,集对分析与结构水资源学方法相结合仍面临诸多挑战,理论基础层面上两者结合的理论支撑有待加强,应用研究层面上两者结合的深度和广度尚待系统深化与开拓。为此,本文从基于关系结构的方法论角度^[2,24],进一步解析结构水资源学方法系统三要素结构原理(简称三元结构原理),基于该原理阐述集对分析在水资

源系统建模、优化、识别、模拟、预测、评价、决策、推理等结构水资源学方法中的应用进展,为进一步推动结构水资源学这一建设中的水资源学新学科分支的发展提供理论支持与实践依据。

1 结构水资源学方法系统三元结构原理

结构水资源学方法属于水利科学体系中的技术科学层次^[2,25],其研究领域处于巴斯德象限^[26],因此结构水资源学方法也可认为是研究各种水资源问题、具有普适性的水科学研究方法^[27]。自然科学的研究方法一般是以研究对象 a 为起点,以实现研究目标 c 为终点,研究过程中一般需要由研究变量 b 作为中介^[28]。其中,研究对象与研究变量之间的关系 ab 称为论据关系或研究条件,属于亚里士多德三段论中的小前提关系;研究变量与研究目标之间的关系 bc 称为论证关系或研究模型,属于亚里士多德三段论中的大前提关系^[29-31]。根据亚里士多德三段论公理^[32],上述论证关系对论据关系的作用 $ab@bc$ 可把研究前的研究对象与研究目标之间的未知关系 ac (称为研究问题)转化为已知关系 $ac=ab@bc$ (称为研究结论),其属于亚里士多德三段论中的结论关系^[30-31,33]。换言之,从基于普遍联系和关系结构的系统论角度^[2,24]认识水资源问题的研究过程,要素不能离开系统而独立存在,结构水资源学方法本身可视为一个系统,称为结构水资源学方法系统,其由研究对象、研究变量、研究目标三要素构成,论据关系 ab 是系统的输入关系,论证关系 bc 是系统的转换关系,而结论关系 ac 是系统的输出关系,这3种作用关系称为结构水资源学方法系统三要素。可见,上述三要素分别对应于亚里士多德三段论中的小项、中项、大项^[32],结构水资源学方法系统是亚里士多德三段论的典型应用^[23,32],也是三分法研究方法论^[34-35]在水资源系统问题中的应用。下面以目前常见的一些结构水资源学方法为例作进一步阐述。

建模对象、建模变量、建模目标三要素构成水资源建模方法系统,其中所研究的水资源系统是建模对象,与系统有关的某种定量关系构建是建模目标,与建模对象和建模目标都有关的中介变量是建模变量,建模变量与建模目标之间的关系是研究模型。例如,水文站水位-流量关系曲线的构建问题中^[36],所在河段水位-流量关系系统是建模对象,河段的水位、流量是建模变量,确定该河段水位与流量之间的关系曲线是建模目标,水位与流量之间的幂函数关系是研究模型。可见,建模过程的关键是确定建模变量与建模目标之间的关系。

优化对象、优化变量、优化目标三要素构成水资源优化方法系统,其中所研究的水资源系统是优化对象,希望水资源系统达到的理想状态是优化目标,优化变量是影响优化目标实现且与所研究的水资源系统有关联的主要因素,优化对象与优化变量之间的关系是约束条件,优化变量与优化目标之间的关系是目标函数,也称优化模型。例如,瞬时单位线优化估计问题中,瞬时单位线是优化对象,线性水库的数目个数 n 和调蓄系数 k 两个瞬时单位线参数^[37]是优化变量,用瞬时单位线进行地面汇流计算误差最小是优化目标,研究参数 n 和 k 的变化特性是约束条件,随优化变量变化的瞬时单位线地面汇流计算值与实际汇流值之间的误差函数是优化目标函数;层次分析法判断矩阵的要素权重优化估计问题中,层次分析法是优化对象,判断矩阵的要素及其权重是优化变量,判断矩阵的要素及其权重在层次分析法中的作用特性是约束条件,一致性指标系数是优化目标函数^[38]。可见,优化方法实现过程的关键是确定优化变量及其与优化目标之间的关系。

识别对象、识别指标、识别目标三要素构成水资源识别方法系统,其中需要辨析、诊断、判断的研究对象是识别对象,对研究对象进行辨析、诊断、判断是识别目标,与识别对象有关、实现识别目标的主要途径是识别指标,识别指标与识别目标之间的关系是识别模型。例如,上海市地面沉降风险识别问题中,沉降风险因素是识别对象,抽取地下水等7种因素是识别指标,确定这些因素中哪些是影响上海市地面沉降的主要风险因素是识别目标,反映识别指标对识别目标影响关系程度的层次分析法判断矩阵是识别模型^[39]。可见,识别方法实现过程的关键是确定识别指标及其与识别目标之间的关系。

模拟对象、模拟变量、模拟目标三要素构成水资源模拟方法系统,其中需要模拟的研究对象是模拟对象,对研究对象某关注属性或过程实现模拟是模拟目标,与模拟对象有关、实现模拟目标的主要变量是模拟变量,模拟变量与模拟目标之间的关系是模拟模型。例如,旱灾风险单指标评价值的模拟问题中,单指标评价值是模拟对象,表征旱灾风险单指标评价值不确定性影响因素的差异度系数是模拟变量,估计旱灾风险单指标评价值的置信区间是模拟目标,表征差异度系数与旱灾风险单指标评价值置信区间之间不确定性关系的三角模糊数及其随机模拟公式是模拟模型^[40]。可见,模拟方法实现过程的关键是确定模拟变量及其与模拟目标之间的关系。

预测对象、预测因子、预测因变量三要素构成水资源预测方法系统,其中需要预测的研究对象是预

测对象,预测对象中某关注属性或过程是预测因变量,与预测对象有关、影响预测因变量的主要变量是预测因子,预测因子与预测因变量之间的关系是预测模型。例如,山东省年用水量预测问题中,全省年用水量是预测对象,灌溉用水定额等影响因素是预测因子,未来年用水量是预测因变量,表征这些预测因子与其年用水量取值之间的历史相似关系是预测模型^[41]。可见,预测方法实现过程的关键是确定预测因子及其与预测因变量之间的关系。

评价对象、评价指标、评价目标三要素构成水资源评价方法系统,其中评价对象与评价指标之间的关系构成指标体系,评价指标与评价目标之间的关系构成评价模型。例如,淮北市水资源承载力评价问题中,淮北市各年水资源承载力等级状态是评价对象,人均水资源量等13个指标是评价指标,判断淮北市历年水资源承载力等级状态是评价目标,表征这些评价指标历年样本值与淮北市水资源承载力等级值之间关系的联系数减法集对势是评价模型^[42]。可见,评价方法实现过程的关键是确定评价指标及其与评价目标之间的关系。

决策对象、决策变量、决策目标三要素构成水资源决策方法系统,其中需要选择、决策的研究方案是决策对象,选取最优方案是决策目标,与决策对象有关、实现决策目标的主要途径是决策变量,决策变量与决策目标之间的关系是决策模型。例如,城市防洪标准方案优选问题中,城市防洪标准方案集是决策对象,保护人民生命财产安全等12个指标是决策变量,从方案集中选取最优方案是决策目标,表征这些指标对城市防洪标准理想方案满足关系程度的联系数是决策模型^[43]。可见,决策方法实现过程的关键是确定决策变量及其与决策目标之间的关系。

推理对象的小前提关系、大前提关系、结论关系三要素构成水资源推理方法系统,其中小前提关系是论据关系,作为推理规则的大前提是论证关系,需要取得的推理对象某判断关系是结论关系,论据关系与论证关系之间的关系合成运算是推理模型。例如,安徽省各地市水资源供给侧与需求侧系统耦合协调评价问题中,反映各地市水资源供给侧和需求侧系统综合评价水平的同异反联系数是小前提论据关系,这些供给侧和需求侧系统同异反联系数的逻辑乘法运算是大前提论证关系,反映各地市水资源供给侧和需求侧耦合协调度的联系数是结论关系^[44];在利用前期连续 m 年径流等级状态信息预测第 $m+1$ 年径流等级状态的于桥水库来水量模糊推理预报问题中,反映预报当年的前期连续 m 年径流等级状态信息的模糊集是小前提关系,在 n_1 年历

史径流资料系列中归纳出的 (n_1-m) 组 m 次复合模糊条件语句是大前提关系,反映预报当年径流等级状态信息的模糊集是结论关系。可见,推理方法实现过程的关键是确定大前提关系这一论证关系^[45]。

综上,推理方法实现过程中大前提论证关系本身反映了推理对象的命题与推理目标之间的关系,而上述前7种结构水资源学方法实现过程的关键都是确定研究变量及其与研究目标之间的关系,这些关系均是论证关系。确定了论证关系后,将给定研究对象的研究变量值代入这些论证关系中,就可实现研究目标。

2 集对分析在结构水资源学方法中的应用

2.1 在水资源系统建模方法中的应用

分析水资源系统建模问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,应用集对分析理论及其联系数方法,基于“客观承认-系统描述-定量刻画-具体分析-应用验证”,即集对分析方法论^[12],从同异反三方面处理水资源系统问题中建模变量与建模目标之间的不确定性关系问题,形成了水资源集对建模方法子系统^[46]。在水资源集对建模方法子系统中,由相关联的两个水资源集合组成的水资源集对系统是建模对象,例如黄河陕县水文站与长江宜昌水文站的年径流组成了水资源集对系统。集对系统的同异反模糊关系是建模变量,确定集对分析的联系数结构形式和计算值是建模目标,建模变量与建模目标之间的关系是建模方法。水资源集对建模方法可认为是水资源模糊集建模方法的一种拓展,关注模糊隶属度在 $[-1, 1]$ 区间上变化,关注多个模糊关系间的联系和转化^[15,47]。集对分析与模糊数学之间联系密切^[48-49],集对分析联系数的同异反关系结构中,同一度 a 、差异度 b 、对立度 c 分别是集对两集合 A 和 B 之间同反合3类不同联系属性的模糊关系^[15],模糊数学中的模糊集是定义在单个论域集合上的隶属函数,集对分析中的联系数 u 是定义在有正负型、反比型等对立联系^[17-18,50]的两个论域集合 A 和 B (这两个集合构成集对系统)上,能完整表示两集合联系程度的同异反关系结构函数^[12],表达式为

$$u = a + bi + cj \quad (1)$$

式中 i, j 分别为差异度系数、对立度系数,同一度系数为1。式(1)联系数中同一项 a 、对立项 cj 是相对确定的,差异项 bi 是相对不确定的,满足一分为三^[34, 51-52]的划分条件,即 $a+b+c=1$ 。不确定的差异项可基于宏观不确定的差异度和微观不确定的差异度系数,在同一项与对立项之间关系为正负型对立

情况下,在 $[-1, 1]$ 区间上视 a, b 和 c 不同取值情形而动态取值;不确定的差异度系数的取值随确定的同一项与对立项之间对立关系的变化而变化^[11-12,53]。可见,联系数是由确定性模糊关系(a, c)和不确定性模糊关系(b)组成的关系结构函数,反映了集对系统确定性与不确定性之间对立、统一及转化的变化规律^[11,49]。集对分析是基于同异反模糊关系进行联系与转化的不确定性分析理论,同时也是基于一分为三辩证思维的系统不确定性定量分析理论^[18]。模糊关系及其运算构成了模糊数学的方法体系^[54],而基于3个模糊关系及其运算的集对分析可以认为是模糊数学用于处理辩证关系问题的拓展^[47]。换言之,模糊数学是集对分析建模理论的重要基础和量化工具,集对分析是模糊数学与辩证思维相交叉而形成的新兴人工智能学科分支^[55-56]。可见,模糊集方法与集对分析在理论基础、不确定性问题特征、符合关系满足程度、模糊关系运算、逻辑推理等方面具有密切的内在联系^[48,57]。

式(1)中集对系统的确定性模糊集和不确定性模糊集的隶属度分别为 $a+c$ 和 b ,确定性模糊集中同一性、对立性模糊子集的隶属度分别为 a 和 c 。式(1)中联系数的同一度、对立度和差异度由确定性与不确定性的对立刻画以及确定性中的同一性与对立性的对立刻画得到,差异度系数的正负和取值反映差异度转化到同一度或对立度的方向和转化程度。上述模糊信息比较全面地描述了集对系统在两集合联系程度方面的同异反辩证联系信息和确定、不确定性信息,基于同异反模糊关系结构的联系数比单个模糊集合上的模糊集隶属函数和两个模糊集合上的模糊关系可提供更多信息^[49,58]。例如,可利用两个正实数 x 和 y 的模糊接近性计算式 x/y (当 $x < y$)或 y/x (当 $x > y$)来构造式(1)中同异反联系分量。

在正负型对立关系的情形下,式(1)中对立度系数取-1,差异度系数在 $[-1, 1]$ 取值,在 $[-1, 1]$ 区间内取值的联系数实际上反映了模糊集隶属函数的值域从同属性模糊集在 $[0, 1]$ 内取值,拓展到不同属性模糊集在 $[-1, 1]$ 内取值^[59-60],这实际上也正是可变模糊集的思想^[61]。联系数可用来表示可变模糊集的相对差异函数^[47],联系数在 $[-1, 1]$ 区间上的量变可用来反映集对系统同一度、差异度、对立度不同模糊关系的质变^[62]。吴开亚等^[63]指出联系数实际上是值域在 $[-1, 1]$ 取值的相对差异度,联系数可转化为可变模糊集的相对隶属度。综上,模糊集、可变模糊集在水文水资源系统建模中已取得了丰硕成果^[64],作为同异反3个模糊关系组成的关系

结构函数,集对分析在水文水资源系统建模中逐渐得到了广泛的应用^[15],特别是用联系数描述建模变量与建模目标之间的不确定关系具有显著优势。

2.2 在水资源系统优化方法中的应用

分析水资源系统优化问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统优化问题,形成了水资源集对优化方法子系统。在水资源集对优化方法子系统中,实际水资源系统、联系数系统都可以是优化对象。例如,利用模糊联系度计算公式和各监测点指标样本值的最优值、最劣值计算各监测点指标的同一度和对立度,进而根据监测点的相对贴进度和代表性对监测点进行优化布设^[65],此时研究区的环境监测点为优化对象,监测点的优化布局为优化目标,各监测点指标的联系数为优化变量。类似地,利用模糊联系度计算公式和各污水处理工艺方案指标样本值计算各方案相对贴进度,作为工艺设计方案的效用函数,据此优化目标函数进行方案优选^[66]。

刘双跃等^[67]为克服单一分数确定考评级别、同分数必定同安全程度、高分安全程度一定优于低分等不足,基于同异反联系数计算原理,构建矿井通风等专业评价指标样本值与安全质量标准化等级之间的联系系数,判断各指标对不同安全等级的隶属度、集对势、不确定性,据此优化评定不同时期矿井安全态势,结果表明联系数方法提高了考评结果的可靠性。邬敏等^[68]在研究中设定了不同环境质量评价标准等级对应的联系数目标值,以联系数计算值与目标值之间的误差最小为目标函数,以差异度系数为优化变量,用遗传算法优化求解差异度系数,计算各综合联系数的分级判别值,对环境监测点的环境质量等级进行了评判。张诗琪等^[69]为挖掘五元联系数的不确定性差异度项相互迁移转化过程中的不确定信息,优化联系数集对势的计算,提出将偏同差异度、偏反差异度中的不确定信息迁移到中差异度项,全面分配这些差异项不确定信息,克服了减法集对势计算中联系分量系数主观设定的局限性。刘冀等^[70]为在级别划分较多时合理确定差异度分量系数值,采用以前相邻多月径流历史值预测当前月经流的方法,对月经流值进行分级量化处理,由当前月的前相邻月经流等级集与历史上的前相邻月经流等级集构建集对,根据联系数确定最相似历史前相邻月经流等级集,建立当前月经流与最相似的历史前相邻月经流等级集的线性回归预测模型,以平均相对误差最小为判定准则,利用优化算法来优化联系数中的差异不确定系数和相似集合样本数。综上,联系数在确定优化变量及其与优化目标之间的关系

方面具有广泛的应用前景。

2.3 在水资源系统识别方法中的应用

分析水资源系统识别问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统识别问题,形成了水资源集对识别方法子系统。在水资源集对识别方法子系统中,目前的研究主要应用集对分析联系数方法处理识别系统辨析过程、识别指标与识别目标之间关系建立过程中的不确定性问题,特别是如何合理确定识别指标与识别目标之间符合关系程度的模糊关系问题^[16]。例如,高洁等^[71]应用模糊模式识别方法,利用预测因变量及其影响因子的历史样本数据的统计特征构建预测因变量的分类模式集,各分类模式和未来预测因变量影响因子(预测样本)对相同的参照系统分别构建集对,计算了各分类模式和预测样本集对的反比型对立关系的联系数,构造了预测因子对其分类模式的同异反联系数作为识别指标。

根据预测样本和各类样本联系数的同异反距离,按照同异反模式识别的择近原则或与距离成反比为识别目标,计算预测样本的相似预测值,吴开亚等^[72]把上述集对聚类预测方法成功应用于安徽省生态足迹预测中。冷梦辉等^[73]运用集对分析方法对洪水基流分割非参数检验方法进行了优选。刘俊杰等^[74]运用集对分析对清流河流域蓝绿水资源进行了分类,分析了不同时间尺度下蓝绿水资源丰枯演变规律。谢飞等^[75]为合理判别水库控制流域不同汛期、动态协调洪水资源利用与防洪安全保障之间的平衡关系,以全年整个汛期时段为识别对象,在对汛期分期影响因素物理成因分析的基础上,把影响汛期分期的5个主要因素作为汛期划分的识别指标,用指标值的分级量化方法计算不同时段指标值与非主汛期、主汛期之间的联系系数,根据联系数值大小进行了汛期分期判别。综上,用联系数在确定识别指标与识别目标之间的不确定关系方面具有广泛的应用前景。

2.4 在水资源系统模拟方法中的应用

分析水资源系统模拟问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统模拟问题,形成了水资源集对模拟方法子系统,是目前水资源不确定性研究的一个前沿热点^[22]。在水资源集对模拟方法子系统中,关键是确定模拟变量及其不确定性分布形式,再通过随机模拟等模拟方法实现模拟目标。例如,汪哲荪等^[76]利用七元联系数描述流域防洪工程风险各评价指标样本值对评价标准等级的符合程

度模糊关系,联系数中的偏同、偏中和偏反差异度系数分别用三角模糊数 $(0,0.5,1.0)$ 、 $(-0.5,0,0.5)$ 、 $(-1.0,-0.5,0)$ 表示。通过三角模糊数的随机模拟^[77]计算差异度系数,进而模拟指标样本值符合评价标准等级的联系数值和风险评价等级值,得到具有置信概率的风险评价结果,其中模拟对象是防洪工程系统,模拟目标是防洪工程系统的风险模拟评价,模拟变量是评价指标样本联系数。

金菊良等^[78]对三元联系数中的差异度系数取为三角模糊数 $(-1,0,1)$,对五元联系数中的偏同、偏中和偏反差异度系数分别取三角模糊数 $(0,0.5,1)$ 、 $(-0.5,0,0.5)$ 、 $(-1,-0.5,0)$,通过随机模拟三角模糊数取值^[77]得到差异度系数模拟值和联系数模拟值,从而得到具有置信概率的水资源承载力评价结果。式(1)表示的三元联系数中减法集对势随同异反联系分量 a 、 b 、 c 的变化而变化^[79]。在减法集对势计算中,差异度系数取 $(a-c)$ 只是最可能值,实际上在 $[-c,a]$ 区间上差异度系数都有可能取值,其中最大可能值 a 表示差异度项全部转化为同一度项,最小可能值 $-c$ 表示差异度项全部转化为对立度项。赵伟等^[80]据此提出用三角模糊数 $(-c,a-c,a)$ 作为模拟模型,描述差异度系数的不确定性动态取值,通过随机模拟三角模糊数可得到给定三元联系数情形下的减法集对势取值的置信区间,在安徽省历史年份水资源承载力评价应用中得到了各年水资源承载力评价等级值结果的置信区间。周铁军等^[81]基于式(1)表示的三元联系数的半偏减法集对

势产生新的三元联系数 $\left(a + b \frac{a}{a+b} + \left(b - b \frac{a}{a+b} - b \frac{c}{b+c}\right)i + \left(c + b \frac{c}{b+c}\right)j\right)$,再考虑对立度项经差异度转化到同一度项的增量项 $c \frac{b}{b+c} \frac{a}{a+b}$,也可认为这是同一度项经差异度项转化到对立项所减少的项。类似地,同一度项经差异度转化到对立度项的增量项 $a \frac{b}{a+b} \frac{c}{b+c}$,也可认为是对立度项经差异度项转化到同一度项所减少的项,据此构建新的三元联系数同一度、对立度取值变化的三角模糊数,从而进行随机模拟。金菊良等^[40]为克服五元联系数中各差异度系数的三角模糊数静态取值的不足,挖掘差异度系数随评价指标样本值联系数变化而变化的动态信息,类比三元减法集对势模拟思路^[80],依据五元半偏减法集对势计算公式的特点,五元联系数中综合差异度系数取值的三角模糊数取为 $[-(c+0.5b_3)/(b_1+b_2+b_3+c),(a+0.5b_1)/(a+b_1+$

$b_2+b_3)-(c+0.5b_3)/(b_1+b_2+b_3+c),(a+0.5b_1)/(a+b_1+b_2+b_3)]$,通过随机模拟该三角模糊数可得给定五元联系数情形下的减法集对势取值的置信区间,其中 a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c 分别为五元联系数的同、异、反5个联系分量。赵齐雅等^[82]提出三元联系数的差异度系数随评价指标样本值落在评价标准等级的1、2、3级,而动态取三角模糊数 $(1/3,2/3,1)$ 、 $(-1/3,0,1/3)$ 、 $(-1,-2/3,-1/3)$,据此随机模拟评价指标样本值联系数,得到了安徽省宿州市各年旱灾风险评估的置信区间,反映了实际的评估结果的不确定性变化情况。石询询等^[83]利用半偏联系数反映联系数不同联系项之间的迁移率,揭示了联系数系统的微观发展趋势的特点,验证了三元联系数半偏减法集对势就是整体效应全偏联系数,根据三元联系数同异反联系分量相互迁移转化关系,利用整体偏联系数方法构造了联系分量的动态变化特征,其中同一度的变化特征取为三角模糊数 $\left(a - a \frac{b}{a+b+c} - a \frac{b}{a+b+c} \frac{c}{a+b+c}, a, a+b \frac{a}{a+b+c} + c \frac{b}{a+b+c} \frac{a}{a+b+c}\right)$,利用整体偏联系数修正联系分量 a 、 b 和 c 比用半偏联系数修正联系分量^[42]更显合理。综上,确定具有不确定性的变量(例如差异度系数)作为模拟变量,用联系数描述模拟变量与模拟目标之间的不确定关系具有明显优势和广泛的应用前景。

2.5 在水资源系统预测方法中的应用

分析水资源系统预测问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统预测问题,形成了水资源集对预测方法子系统。在水资源集对预测方法子系统中,目前的研究集中在用集对分析进行预测因子的不确定性识别、预测因子与预测因变量之间不确定性关系的联系数表达方面,目前已提出了集对相似预测、集对回归预测、集对聚类预测、集对组合预测等方法^[16,84]。

王国强^[85]把预测因子与预测因变量之间的不确定相关曲线细分为高、中、低3个相关区间,在某高相关区(或低相关区)与预测因变量构建集对、计算相应的同异反联系数,而中相关区的联系数为 $0+1i+0j$,由预测因子和预测因变量的历史样本资料可计算出高、中、低相关区间的同异反联系数,据此可得各预测因子历史样本值的联系数,由这些预测因子样本值的联系数与预测因变量建立多元回归模型,与多元回归预报模型相比,提高了概率天气预报

的准确率。针对多元回归模型天气预报过程中各预测因子的相对重要性不断变化的特点,王国强等^[86]提出用变异系数识别模糊预测因子,建立了基于联系数的天气预报多元回归模型,在浙江省绍兴市气象台梅汛期雨量预报应用中提高了预测精度。冯利华等^[87]利用反映水资源过程的年径流量与预测因子间的相关关系,通过预测因子的变化预估水资源过程的变化,筛选出影响雅马渡站年径流量的3个预测因子,反复调整预测因子各分区段的阈值使得年径流拟合率最大,计算历年各预测因子在各分区与预测因变量年径流的同异反联系数,建立各预测因子联系数值与年径流之间的回归预报模型,结果表明预测效果优于年径流回归预测模型。基于预测过程中所有预测因子的相对重要性不断变化的特点,蒋尚明等^[88]利用各预测因子与预测因变量之间的同异反联系数信息建立预测模型,明显提高了预测精度。金菊良等^[89]提出用相关系数与联系数相结合的方法确定主要预测因子,计算预测因子预测年与各历史样本集对的联系数,把这些联系数转化为相对隶属度函数,作为度量预测样本与历史样本间的模糊相似程度,取最相似的历史样本预测因变量的加权平均值作为预测样本的预测因变量值。周戎星等^[41]将集对相似方法成功应用于山东省用水量预测,结果表明预测精度较高。郭彦等^[90]建立了基于联系数的北京市需水量组合预测模型,由于综合了各单个预测方法的优势,预测结果比较稳健。李辉等^[91]用集对组合预测方法对2014—2016年全国水资源承载力进行预测,结果表明集对组合预测模型的拟合误差和预测误差比较接近,可克服单个预测模型的不足,预测精度较高。综上,用联系数描述预测因子与预测因变量之间的不确定关系具有明显优势和广泛的应用前景。

2.6 在水资源系统评价方法中的应用

分析水资源系统评价问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统评价问题,形成了水资源集对评价方法子系统。在水资源集对评价方法子系统中,目前的研究集中在用联系数及其伴随函数合理确定评价指标样本值与反映评价目标的评价标准等级之间符合关系程度的模糊关系问题方面^[16]。式(1)中联系分量反映不同的模糊关系,故根据评价指标样本值与所论评价标准等级处于同一评价等级、相邻评价等级和相隔评价等级可分别判为同、异、反模糊关系。差异度系数在 $[-1, 1]$ 取值,用分段函数表示指标样本值越接近所论评价标准等级时联系数和差异度系数取值越接近于1,指

标样本值越接近与所论评价标准等级相隔的等级时联系数和差异度系数取值越接近于-1,用宽域式隶属曲线表示评价指标样本值对所论评价标准等级符合程度的联系数变化特征,反映了同异反联系项之间相互联系相互转化^[92]。

吴开亚等^[93]建立了用于评价指标样本值对城市涝灾影响标准等级符合程度的六元联系数,根据各联系分量的含义构造了六元联系数中偏同差异度系数、中差异度系数和偏反差异度系数的三角模糊数,通过模糊集的截集方法计算三角模糊数值,得到用于城市涝灾影响等级评价的联系数值的置信区间,使得由以往的实数值评价结果发展为置信区间评价结果,与实际评价问题通常具有不确定性的特征更相符合。汪哲荪等^[76]把三角模糊数隶属度转化成三角分布函数,通过随机模拟计算符合三角模糊数隶属度分布的各差异度系数值,得到相应联系数值和综合评价结果的置信区间。王红芳等^[94]把不同水文频率理论曲线与经验频率点集之间相对误差的变化范围划分为低、中、高3个误差区间,作为集对同异反关系的相应判别区间,例如 $(0, 5\%]$ 、 $(5\%, 10\%]$ 、 $(10\%, +\infty)$,计算反映拟合误差关系结构的不同水文频率理论曲线的联系数值,从而定量评估水文频率理论曲线的拟合效果。金菊良等^[79]提出了实现三元联系数宏观整体趋势取值的减法集对势计算公式,在系统综合评价及障碍因子诊断问题中得到了应用。吴啸骏等^[95]构造了热传递减法集对势,应用于安徽省江淮丘陵区的水资源承载力评价。张志君等^[96]采用模糊集对分析方法,构建了评价指标体系,对新疆水资源安全评价进行了评价。王平等^[97]应用五元联系数减法集对势和级别特征值方法对陕西省10地市水利高质量发展水平进行了评价。周亮广等^[98]提出用七元半偏减法集对势分析江淮丘陵区农业水土资源匹配状况。金菊良等^[99]构建了判断各子区域水资源空间均衡程度的五元联系数方法。李征等^[42]提出用半偏联系数描述、修正水资源承载力评价指标样本三元联系数的同异反分量。金菊良等^[100]提出了三元联系数一阶效应全偏联系数,与减法集对势之间的平均绝对误差为3.1%,反映了联系数相对确定性的宏观发展趋势,并在安徽省水资源承载力评价中得到了验证。周戎星等^[101]鉴于集对势方法挖掘联系数中不确定性的不足,将三元联系数减法集对势看作正态分布的随机变量,采用95%水平下集对势置信区间估计旱灾风险。为挖掘减法集对势对三元联系数差异度不确定项向确定性项同一度和对立度分配后还剩余的确定性差异度信息,Jin等^[102]提出了

基于二次差分的减法集对势,提高了评价结果的可靠性。综上,用联系数描述评价指标与评价目标之间单指标评价的不确定关系具有明显优势和广泛的应用前景。

2.7 在水资源系统决策方法中的应用

分析水资源系统决策问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统决策问题,形成了水资源集对决策方法子系统。在水资源集对决策方法子系统中,目前的研究主要应用集对分析联系数方法处理多属性决策系统识别、决策变量与决策目标(例如决策方案的益损值最优)之间关系建立过程中的不确定性问题,集中在如何合理确定决策变量与反映决策目标之间符合关系程度这一模糊关系问题方面,可认为这是以决策方案为评价对象的一类特殊评价问题^[16]。

鉴于决策方案属性指标取值用三角模糊数(a_1, a_2, a_3)表示时,一般认为三角模糊数的中值 a_2 取值相对确定、在取值区间 $[a_1, a_3]$ 上其他位置取值相对不确定,故可认为三角模糊数是含有确定性信息和不确定性信息的系统。据此,刘秀梅等^[103]将三角模糊数(a_1, a_2, a_3)对应为二元联系数 $u = a_2 + (a_3 - a_1)i$,差异度系数在 $[\frac{a_1 - a_2}{a_3 - a_1}, \frac{a_3 - a_2}{a_3 - a_1}]$ 区间取值。

这样可以把三角模糊数多属性决策过程转化为联系数运算过程。根据直觉模糊数的含义,刘秀梅等^[104]将直觉模糊数的隶属度、犹豫度和非隶属度分别对应为联系数的同一度、差异度和对立度,将直觉模糊数表示为联系数,建立了基于联系数的信息不完全直觉模糊多属性决策方法。直觉模糊集得分函数实际上是未考虑不确定性差异项信息下联系数的减法集对势 $a-c$,因此可以用减法集对势^[79]作为直觉模糊集相应的得分函数。得分函数度量模糊集的隶属程度与减法集对势度量集对的联系程度的作用是一致的,都是重要的伴随函数。刘永安等^[43]依据200年一遇、300年一遇、500年一遇和800年一遇4种防洪标准方案下12个评价指标值与其相对最佳值的距离进行1、2、3类分级量化判断,计算各方案联系数值,据此选取最优方案。陆广地^[105]将模糊直觉集转换为同异反三元联系数,并用所定义的广义集对势函数进行模糊群决策方案的选优。张斐^[106]由备选方案与理想最优方案确定集对,计算各备选方案的联系数值(例如减法集对势)选择最优方案,可克服TOPSIS可能出现的“逆序”的现象。赵克勤^[107]计算了区间数、三角模糊数、梯形模糊数的算术平均值、标准差,分别作为二元联系数的同一

度和差异度,从而用二元联系数的取值原则进行不确定性多属性决策。综上,用联系数描述决策变量与决策目标之间的不确定关系具有明显优势和广泛的应用前景。

2.8 在水资源系统推理方法中的应用

分析水资源系统推理问题中不确定性形成过程的物理成因及其变化特征,基于集对分析方法论,从同异反三方面处理水资源系统概念、判断和推理过程方面的不确定性问题,形成了水资源集对推理方法子系统。在水资源集对推理方法子系统中,目前的研究主要是应用集对分析同异反联系数将论据关系、论证关系表征为集对命题,论据关系与论证关系间的合成运算表达为集对命题之间的逻辑运算形式,例如多个联系数中同异反关系之间的逻辑加法、逻辑乘法运算过程^[44]。类似于基于康托集合的形式逻辑、基于模糊集合的模糊逻辑、基于可拓集合的可拓逻辑,集对逻辑是基于集对命题及其真值的不确定性,并用表示命题及其真值的同异反联系数进行运算的逻辑推理^[44,108]。

张峻瑜^[109]提出了基于同异反联系分量取大取小运算的集对命题联系数合取、析取运算的计算公式,为水资源集对逻辑研究提供了思路。模糊数学中的模糊逻辑是通过模糊关系及其合成运算建立的模糊推理形式,水资源集对逻辑运算由于涉及多个联系数同异反关系的逻辑运算,显得更为复杂。黄德才等^[110]提出了基于同异反联系分量代数运算的集对命题联系数的加减乘除运算,主要适用于网络计划等特定问题,例如在网络计划中反映出现突发事件等反常情况下需要增加工作时间的对立度系数取为1^[111]。成科扬^[112]分别用同异反联系分量表示模糊命题的真、不确定和假的程度,用这些联系分量的取大取小运算构造了模糊命题之间的析取、合取计算公式。王万军^[113]分别用集对同一度、差异度、对立度隶属度定义三元联系数的同异反联系分量,用这样的联系数表示集对命题的真值,用同异反联系分量的取大取小运算构造了不确定集对命题之间的析取、合取计算公式。王霞等^[114]采用类似有理数的四则运算定义了联系数的加法、减法、乘法、除法。基于集对系统联系数与模糊集隶属函数之间的联系,参考模糊逻辑命题的概念,杨亚锋^[115]采用联系数同异反联系分量分别表示逻辑命题的真、假和不确定的3个程度,用双枝模糊逻辑的演算规则和联系分量取大取小运算定义了集对命题的合取、析取逻辑运算公式,在一定程度上补充和完善了模糊逻辑。金菊良等^[44]针对基于四则运算规则的联系数运算方法、基于联系分量取大取小运算的集对模

糊逻辑的不足,为增强集对命题之间合取、析取等命题运算的逻辑合理性、物理解释性和有效性,应用样本值的几何平均具有样本小值的木桶短板效应作用、可反映逻辑“且运算”的功能,样本值的算术平均能反映样本值之间的相互补偿和线性叠加作用、可反映逻辑“或运算”的功能,提出两集对命题联系数合取运算所得联系数中的同一度分量取为两命题联系数同一度分量的几何平均,对立度分量取为两命题联系数对立度分量的算术平均,差异度分量取为两命题联系数差异度分量几何平均和算术平均的平均,再归一化后得到两集对命题联系数合取运算所得联系数,并在水资源承载力耦合协调度评价等问题中得到了应用。综上,用联系数及其逻辑运算描述命题、小前提、大前提及其逻辑运算方面的不确定性具有明显优势和广泛的应用前景。

3 结论与展望

3.1 结论

a. 归纳提出了三元结构原理。研究对象和研究目标分别对应结构水资源学方法实现过程的起点和终点,研究对象与研究目标之间的未知关系就是这些方法如何实现的研究问题。根据亚里士多德的三段论公理,研究对象、研究目标可分别视为小项、大项,通过研究变量这个中项作为中介,搭建研究对象、研究目标二者之间的逻辑连接。具体而言,研究对象与研究变量之间的关系构成论据关系(小前提),研究变量与研究目标之间的关系构成论证关系(大前提),大前提对小前提进行合成作用,从而得到结论关系,结论关系就是研究问题的已知化。从系统功能的角度来看,论据关系、论证关系和结论关系分别对应结构水资源学方法系统的输入、转换和输出,形成了结构水资源学方法论的完整逻辑链条和解析体系。

b. 结构水资源学方法中目前常见的水资源系统建模、优化、识别、模拟、预测、评价、决策、推理方法都符合上述结构水资源学方法系统三要素结构原理。前7种方法中“研究变量与研究目标”的论证关系都属于变量之间的关系,其实现过程反映研究对象、研究变量、研究目标三者之间的信息传递;而推理方法中的“研究对象、研究变量、研究目标”分别对应论据、论证和结论三类关系,其实现过程反映论据、论证和结论关系之间的信息传递,相比而言,推理方法的抽象层次和复杂性高于前7种方法。

c. 集对分析在上述8种结构水资源学方法中的应用过程都是用集对分析同异反联系数方法处理方法实现过程中的关系不确定性问题,特别是在描

述和处理研究变量与研究目标之间的不确定性论证关系方面具有明显优势。例如,利用联系数刻画建模对象对建模目标符合程度的关系不确定性、优化对象对优化目标符合程度的关系不确定性、识别对象对识别目标符合程度的关系不确定性、模拟对象对模拟目标符合程度的关系不确定性、预测对象对预测因变量符合程度的关系不确定性、评价对象对评价目标符合程度的关系不确定性、决策对象对决策目标符合程度的关系不确定性、推理过程中小前提和大前提及其关系合成的不确定性。联系数用于前7种方法的过程一般属于单个联系数的运算过程,运算过程相对比较简单,而用于推理方法的过程则属于多个联系数之间的逻辑运算过程,运算过程相对比较复杂。

3.2 展望

集对分析在结构水资源学方法中的未来应用研究,会进一步聚焦水资源复杂系统问题的不确定性形成过程,采用集对分析方法论,特别是不确定性形成过程的物理成因分析与定量计算相结合的研究途径,开展更深入、更开拓的探索。

a. 在建模方法中的应用方面,如何拓展同一度与对立度之间不同对立关系类型的联系数,这些联系数的伴随函数如何构建。例如表示实数间接近性程度的反比型对立关系的联系数、表示评价指标间权重的互补型对立关系的联系数及其集对势、偏联系数如何构建,是亟待研究的重要方向。

b. 在优化方法中的应用方面,如何根据年径流预测误差最小等实际水资源问题的优化目标,构建合适的优化问题以确定径流丰、平、枯分级阈值等优化变量及其最优值,确定同异反联系数的关系结构,是亟待研究的重要方向。

c. 在识别方法中的应用方面,如何合理确定实际水资源问题中分类模式,构建识别对象对分类模式符合程度的联系数,是亟待研究的重要方向。

d. 在模拟方法中的应用方面,如何合理确定水资源系统问题中不确定性变量及其可能性分布形式,结合所研究的实际水资源问题,深化水资源集对联系数置信区间的合理性分析和应用验证,是亟待研究的重要方向。

e. 在预测方法中的应用方面,如何采用物理成因、统计分析和联系数相结合的方法,合理确定预测因子、预测样本预测因子与历史样本预测因子之间相似性的联系数,是亟待研究的重要方向。

f. 在评价方法中的应用方面,如何根据实际水资源评价指标的评价标准等级阈值随等级而变化的不同特点,合理构建表示评价指标样本值对评价标

准等级符合程度关系的联系数及其减法集对势等伴随函数的计算公式,是亟待研究的重要方向。

g. 在决策方法中的应用方面,如何合理识别实际水资源决策问题中不确定性变量,确定其联系数表征方法,合理构建水资源复杂系统实际问题仿真模拟与联系数相结合的水资源集对决策模型研究,是亟待研究的重要方向。

h. 在推理方法中的应用方面,如何合理确定反映实际水资源推理问题中各系统发展水平状态的同异反联系数及其反映推理机理的联系数逻辑加法、逻辑乘法运算的计算公式,推进联系数之间的逻辑运算方法与应用研究,是亟待研究的重要方向。

参考文献:

[1] 杨帆,杨巍. 结构生物学研究热点[J]. 浙江大学学报(医学版),2019,48(1):1-4. (YANG Fan, YANG Wei. Frontiers in structural biology [J]. Journal of Zhejiang University (Medical Edition), 2019, 48 (1): 1-4. (in Chinese))

[2] 金菊良,周戎星,崔毅,等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(3):7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42 (3): 7-19. (in Chinese))

[3] 乔非,沈荣芳,吴启迪. 系统理论、系统方法、系统工程:发展与展望[J]. 系统工程,1996,14(5):5-10. (QIAO Fei, SHEN Rongfang, WU Qidi. System theory, system means, system engineering-development and prospect [J]. Systems Engineering, 1996, 14 (5): 5-10. (in Chinese))

[4] 魏屹东. 计算智能:一种精确适应性表征的人工智能[J]. 上海师范大学学报(哲学社会科学版),2024,53(6):104-113. (WEI Yidong. Computational intelligence: an artificial intelligence of precise adaptive representation [J]. Journal of Shanghai Normal University (Philosophy & Social Sciences Edition), 2024, 53 (6): 104-113. (in Chinese))

[5] 冯尚友. 水资源系统分析应用的目前动态与发展趋势[J]. 系统工程理论与实践,1990,10(5):43-48. (FENG Shangyou. The current dynamics and development trends of water resources system analysis applications [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1990, 10 (5): 43-48. (in Chinese))

[6] MORLEY M, SAVIĆ D. Water resource systems analysis for water scarcity management: the Thames water case study[J]. Water,2020,12(6):1761.

[7] 金菊良,魏一鸣,丁晶,等. 水资源系统工程的理论框架探讨[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(2):130-137.

(JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing, et al. A study on the theoretics frame of water resources systems engineering [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24 (2): 130-137. (in Chinese))

[8] CUI Yi, JIN Juliang, BAI Xia, et al. Quantitative evaluation and obstacle factor diagnosis of agricultural drought disaster risk using connection number and information entropy [J]. Entropy, 2022, 24 (7): 872.

[9] 戴汝为. 系统科学及系统复杂性研究[J]. 系统仿真学报,2002,14(11):1411-1416. (DAI Ruwei. Research on system science and system complexity [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14 (11): 1411-1416. (in Chinese))

[10] SHU Zhan, KANG Yan, GAO Ying, et al. An interval bilateral regulation framework of water resources supply and demand in irrigation area under water sources uncertainty [J]. Agricultural Water Management, 2025, 307:109266.

[11] 赵克勤,宣爱理. 集对论:一种新的不确定性理论与应用[J]. 系统工程,1996,14(1):18-23. (ZHAO Keqin, XUAN Aili. Set pair theory: a new theory method of non-define and its applications [J]. Systems Engineering, 1996, 14 (1): 18-23. (in Chinese))

[12] 赵克勤. 集对论在人工智能中的若干应用与进展综述[J]. 电子与信息学报,2024,46(2):383-407. (ZHAO Keqin. Some applications and progress of set pair theory in artificial intelligence [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46 (2): 383-407. (in Chinese))

[13] 龚士良. 上海地下水资源管理集对分析[J]. 地下水,1998,20(1):9-11. (GONG Shiliang. Analysis of Shanghai groundwater resources management collection [J]. Groundwater, 1998, 20 (1): 9-11. (in Chinese))

[14] ZHOU Liangguang, JIN Juliang, ZHOU Rongxing, et al. Advances in adjoint functions of connection number in water resources complex systems: a systematic review [J]. Entropy, 2024, 26 (4): 339.

[15] 金菊良,周亮广,崔毅,等. 水资源集对分析方法理论与应用研究进展[J]. 水利学报,2025,56(1):20-31. (JIN Juliang, ZHOU Liangguang, CUI Yi, et al. Research progress on the theory and application of water resources set pair analysis methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (1): 20-31. (in Chinese))

[16] 金菊良,沈时兴,崔毅,等. 面向关系结构的水资源集对分析研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):97-111. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Research progress of relation structure-oriented set pair analysis in water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (1): 97-111. (in Chinese))

[17] 赵克勤. 基于集对分析的对立分类、度量及应用[J]. 科学技术与辩证法,1994,11(2):26-30. (ZHAO Keqin.

- Contrastive classification, measurement, and application based on set pair analysis[J]. Science, Technology, and Dialectics, 1994, 11(2): 26-30. (in Chinese))
- [18] 金菊良,周亮广,崔毅,等.水资源集对系统中的对立关系分析[J]. 水利学报, 2024, 55(6): 666-674. (JIN Juliang, ZHOU Liangguang, CUI Yi, et al. Analysis of the opposition relationship in water resource set pair system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(6): 666-674. (in Chinese))
- [19] 陈邵桂,曾帆.一分为三理论研究综述[J]. 湖南工业大学学报(社会科学版), 2018, 23(5): 57-62. (CHEN Shaogui, ZENG Fan. Summary of the theoretical studies of One Divided by Three[J]. Journal of Hunan University of Technology (Social Science Edition), 2018, 23(5): 57-62. (in Chinese))
- [20] 赵克勤.联系数学的基本原理与应用[J]. 安阳工学院学报, 2009(2): 107-110. (ZHAO Keqin. Application and basic principles of connection mathematics[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2009(2): 107-110. (in Chinese))
- [21] 赵克勤.集对分析的不确定性系统理论在 AI 中的应用[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 16-25. (ZHAO Keqin. The application of uncertainty systems theory of set pair analysis (SPU) in the artificial intelligence [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(2): 16-25. (in Chinese))
- [22] WU Chengguo, NIE Boyu, WANG Xiaoyu, et al. Set pair analysis and system dynamics coupling approach for structure simulation and variation trend evaluation of water resources spatial equilibrium system[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2025, 61(1): e13237.
- [23] 金菊良,陈梦璐.结构水资源学[M]. 北京:科学出版社, 2025.
- [24] 何其映.基于关系结构的知识图谱可视化分析方法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2022.
- [25] 宋振东,董贵成.近二十年来钱学森现代科学技术体系研究综述[J]. 辽东学院学报(社会科学版), 2011, 13(4): 1-12. (SONG Zhendong, DONG Guicheng. Summary of research on Qian Xuesen's modern science and technology system in recent 20 years [J]. Journal of Eastern Liaoning University (Social Sciences), 2011, 13(4): 1-12. (in Chinese))
- [26] 牟连佳,李丕贤,邵洪艳.计算思维与巴斯德象限:计算思维融入信息技术教育的研究框架[J]. 科技创新导报, 2015, 12(25): 20-23. (MOU Lianjia, LI Pixian, SHAO Hongyan. Computational thinking and Pasteur quadrant: a research framework for integrating computational thinking into information technology education[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(25): 20-23. (in Chinese))
- [27] GRIGG N S. Systems engineering and water resources management: a closer relationship is needed[J]. Systems Engineering, 2024, 27(2): 440-444.
- [28] GUO Li, WU Jun, LI Jinghai. Complexity at mesoscales: a common challenge in developing artificial intelligence[J]. Engineering, 2019, 5(5): 924-929.
- [29] LI Yang. Analysis of strategies for enhancing informatization teaching ability of college teachers combined with mathematical statistics multiple regression models[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2023, 9(1): 423-436.
- [30] 林定夷.科学中问题的结构与问题逻辑[J]. 哲学研究, 1988(5): 32-38. (LIN Dingyi. The structure and logic of problems in science [J]. Philosophical Research, 1988(5): 32-38. (in Chinese))
- [31] 林定夷.科学问题与科学目标[J]. 中国社会科学, 1991(5): 29-38. (LIN Dingyi. Scientific problems and objectives[J]. Social Sciences in China, 1991(5): 29-38. (in Chinese))
- [32] 吴宝祥.亚里士多德的三段论及其扩展[D]. 成都:四川大学, 2017.
- [33] XU Hanbing, SONG Songbai, LI Jun, et al. Hybrid model for daily runoff interval predictions based on Bayesian inference [J]. Hydrological Sciences Journal, 2023, 68(1): 62-75.
- [34] 孙东川.三分法与管理工作的[J]. 管理学报, 2009, 6(7): 861-866. (SUN Dongchuan. On the tripartite thinking method and management [J]. Chinese Journal of Management, 2009, 6(7): 861-866. (in Chinese))
- [35] 陈珊.庞朴“一分为三”说研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [36] 罗铭,丁锐,黄尔,等.山区河流水位流量关系曲线研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 137-142. (LUO Ming, DING Rui, HUANG Er, et al. Study on stage - discharge relationship curve in mountain rivers [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 137-142. (in Chinese))
- [37] 金菊良,丁晶,魏一鸣.瞬时单位线的优化估计[J]. 水力发电学报, 2003(1): 70-75. (JIN Juliang, DING Jing, WEI Yiming. Optimal estimation of instantaneous unit hydrograph [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(1): 70-75. (in Chinese))
- [38] 金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 65-70. (in Chinese))
- [39] 金菊良,魏一鸣,付强,等.改进的层次分析法及其在自然灾害风险识别中的应用[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 20-24. (JIN Juliang, WEI Yiming, FU Qiang, et al.

- An improved analytic hierarchy process and its application to risk identification of natural disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 20-24. (in Chinese))
- [40] 金菊良,李蔓,崔毅,等. 基于五元半偏减法集对势模糊数随机模拟方法的旱灾风险评估[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 1-13. (JIN Juliang, LI Man, CUI Yi, et al. Drought risk assessment based on the random simulation method of five-element semi-partial subtraction set potential fuzzy numbers [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 1-13. (in Chinese))
- [41] 周戎星,潘争伟,金菊良,等. 集对分析相似预测在用水量预测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 67-71. (ZHOU Rongxing, PAN Zhengwei, JIN Juliang, et al. Application of the method of set pair analysis based on similarity forecast model in water consumption prediction[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 67-71. (in Chinese))
- [42] 李征,金菊良,崔毅,等. 基于半偏联系数和动态减法集对势的区域水资源承载力评价方法[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1656-1669. (LI Zheng, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Evaluation method of regional water resources carrying capacity based on semipartial connection number and dynamic subtraction set pair potential[J]. Journal of Lake Science, 2022, 34(5): 1656-1669. (in Chinese))
- [43] 刘永安,王文圣. 集对分析法在城市防洪标准方案优选中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 77-80. (LIU Yong'an, WANG Wensheng. Set pair analysis and its application to optimization of standard schemes of urban flood control [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 77-80. (in Chinese))
- [44] 金菊良,沈时兴,吴成国,等. 基于集对推理的区域水资源承载力耦合协调度评价方法[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 1-8(2024-12-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20241225.1701.002.html>. (JIN Juliang, SHEN Shixing, WU Chengguo, et al. Evaluation method of coupled coordinated degree of regional water resources carrying capacity based on set pair reasoning[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 1-8(2024-12-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20241225.1701.002.html>. (in Chinese))
- [45] 王本德,曹玉涛,唐国磊. 于桥水库来水量模糊推理预报及引水方式研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(1): 63-64. (WANG Bende, CAO Yutao, TANG Guolei. Study and application on interbasin diversion methods of Yuqiao reservoir[J]. Yellow River, 2007, 29(1): 63-64. (in Chinese))
- [46] 王文圣,李跃清. 水文水资源集对分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 27-32. (WANG Wensheng, LI Yueqing. Set pair analysis of water resources and hydrology[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 27-32. (in Chinese))
- [47] 赵吴静,吴开亚,金菊良. 防洪工程安全评价集对分析: 可变模糊集模型[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 5-7. (ZHAO Wujing, WU Kaiya, JIN Juliang. Set pair analysis: variable fuzzy set model for flood control engineering security evaluation [J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 5-7. (in Chinese))
- [48] 赵克勤. 试论集对分析与模糊数学的关系[C]//中南模糊数学与系统理论和应用成果交流会. 大庸: 中国中南地区模糊数学与系统分会, 1991: 310-311.
- [49] 张斌. 多目标系统决策的模糊集对分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 1997(12): 108-114. (ZHANG Bin. The fuzzy set pair analysis way of multi-objective system decision [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 1997(12): 108-114. (in Chinese))
- [50] 刘颖,于冬梅,程显毅. 联系数学中的几个问题[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(10): 77-82. (LIU Ying, YU Dongmei, CHENG Xianyi. Several questions in connection mathematics [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(10): 77-82. (in Chinese))
- [51] 周德义. 论中国传统文化的“一分为三”哲学思想[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2002, 3(1): 15-20. (ZHOU Deyi. Discuss the philosophic theory of the traditional culture: "One divided into Three" [J]. Journal of Nanhua University (Social Science Edition), 2002, 3(1): 15-20. (in Chinese))
- [52] 张晨英,朱正东,张立鹏,等. 中国古代“一分为三”的时空生成观[J]. 文化创新比较研究, 2022, 6(28): 89-93. (ZHANG Chenying, ZHU Zhengdong, ZHANG Lipeng, et al. "One Divides into Three" theory of time and space generation in ancient China [J]. Comparative Study of Cultural Innovation, 2022, 6(28): 89-93. (in Chinese))
- [53] 金菊良,周亮广,王平,等. 基于相对联系数的区域水利高质量发展评价指标体系筛选方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 43-51. (JIN Juliang, ZHOU Lianguang, WANG Ping, et al. Screening method of evaluation index system for high-quality development of regional water conservancy based on relative connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 43-51. (in Chinese))
- [54] 王文圣,张翔,金菊良,等. 水文学不确定性分析方法

- [M].北京:科学出版社,2011.
- [55] 赵克勤. 自然辩证法可以称“联系科学”吗?:从《自然辩证法通讯》的副标题说起[J]. 自然辩证法通讯, 2008,30(6):99-101. (ZHAO Keqin. Can dialectics of nature be called “connected science”? : starting from the subtitle of *Dialectics of Nature Newsletter* [J]. Journal of Dialectics of Nature,2008,30(6):99-101. (in Chinese))
- [56] 赵克勤,姜玉声. 集对分析中若干系统辩证思维初析[J]. 系统辩证学学报,2000,8(3):32-36. (ZHAO Keqin, JIANG Yusheng. Primary discussion on some systematical and dialectical thinking in set pair analysis [J]. Journal of Systemic Dialectics,2000,8(3):32-36. (in Chinese))
- [57] 陈隽,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源系统分析中模糊隶属度与集对联系系数的不确定性特征辨析[J]. 水电能源科学,2018,36(11):30-33. (CHEN Jun, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. Uncertainties of fuzzy membership degree and set pair-wise connection in analysis of water resources system[J]. Water Resources and Power,2018,36(11):30-33. (in Chinese))
- [58] 张薇薇,金菊良,周玉良,等. 区域地下水资源承载力评价的模糊联系度方法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(6):30-36. (ZHANG Weiwei, JIN Juliang, ZHOU Yuliang, et al. Fuzzy connection degree method for comprehensive evaluation of regional groundwater resources carrying capacity [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2008,40(6):30-36. (in Chinese))
- [59] 朱剑英. 从应用的角度探讨我国模糊数学的发展[J]. 自然杂志,1985(10):709-714. (ZHU Jianying. Exploring the development of fuzzy mathematics in China from an application perspective [J]. Chinese Journal of Nature, 1985(10):709-714. (in Chinese))
- [60] 傅国耀. $[-1,1]$ 上的模糊集及其在集对分析中的应用[J]. 科技通报,1999,15(2):12-14. (FU Guoyao. $[-1,1]$ -Fuzzy sets and their application to setpair analysis[J]. Bulletin of Science and Technology,1999,15(2):12-14. (in Chinese))
- [61] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型:模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报,2005,45(2):308-312. (CHEN Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set: mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources[J]. Journal of Dalian University of Technology,2005,45(2):308-312. (in Chinese))
- [62] 陈守煜. 可变模糊集量变与质变判据模式及其应用[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(10):1879-1882. (CHEN Shouyu. Quantity change and quality change criterion models of variable fuzzy sets theory and their application [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(10):1879-1882. (in Chinese))
- [63] 吴开亚,金菊良,周玉良,等. 流域水资源安全评价的集对分析与可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):6-12. (WU Kaiya, JIN Juliang, ZHOU Yuliang, et al. Set pair analysis based variable fuzzy set assessment model for watershed water resources security[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2008,40(3):6-12. (in Chinese))
- [64] 金菊良,陈鹏飞,陈梦璐,等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报,2019,50(10):1282-1290. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Knowledge map analysis of academic research of Mr. Chen Shouyu, hydrological and water resources specialist[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(10):1282-1290. (in Chinese))
- [65] 李凡修,陈武. 应用模糊集对分析法优化大气环境监测布点[J]. 环境保护科学,2001,27(5):30-32. (LI Fanxiu, CHEN Wu. Optimal setting of environmental monitoring sites by the fuzzy set pair analysis way [J]. Environmental Protection Science,2001,27(5):30-32. (in Chinese))
- [66] 蒋茹,曾光明,李晓东,等. 基于集对分析的污水处理工艺设计优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2007,34(11):70-75. (JIANG Ru, ZENG Guangming, LI Xiaodong, et al. Wastewater treatment process design optimization based on set pair analysis [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2007,34(11):70-75. (in Chinese))
- [67] 刘双跃,王娟,何发龙. 四元联系数对煤矿安全质量标准化的优化研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(12):32-37. (LIU Shuangyue, WANG Juan, HE Falong. Optimization research of coal mine safety quality standardization based on four-element connection number model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012,8(12):32-37. (in Chinese))
- [68] 郭敏,李祚泳,刘智勇,等. 基于遗传集对分析的空气质量评价[J]. 环境科学与技术,2009,32(2):168-171. (WU Min, LI Zuoyong, LIU Zhiyong, et al. Air environment quality assessment based on set pair analysis combined with genetic algorithm [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(2):168-171. (in Chinese))
- [69] 张诗琪,金菊良,崔毅,等. 基于差异优化减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价与诊断研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),1-10(2024-05-23). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240522.1814.002.html>. (ZHANG Shiqi, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Assessment and diagnosis on regional agricultural drought vulnerability based on differential optimization subtraction set pair potential[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 1-10(2024-05-23). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV>.

20240522. 1814. 002. html. (in Chinese))
- [70] 刘冀,徐刚,彭涛,等. 基于参数优化的集对分析月径流预测[J]. 水文,2013,33(1):8-11. (LIU Ji, XU Gang, PENG Tao, et al. Monthly runoff prediction based on set pair analysis with parameters optimization[J]. Journal of China Hydrology,2013,33(1):8-11. (in Chinese))
- [71] 高洁,盛昭瀚. 集对分析聚类预测法及其应用[J]. 系统工程学报,2002,17(5):458-462. (GAO Jie, SHENG Zhaoan. Method and application of set pair analysis classified prediction[J]. Journal of Systems Engineering, 2002,17(5):458-462. (in Chinese))
- [72] 吴开亚,金菊良,王玲杰,等. 集对分析聚类预测方法在区域生态足迹趋势预测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(9):973-977. (WU Kaiya, JIN Juliang, WANG Lingjie, et al. Application of set pair analysis classified prediction method to predicting dynamic change of regional ecological footprint[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33(9):973-977. (in Chinese))
- [73] 冷梦辉,白桦,李二辉,等. 洪水基流分割非参数检验方法优选[J]. 水资源保护,2021,37(4):82-88. (LENG Menghui, BAI Hua, LI Erhui, et al. Optimization of nonparametric test methods for flood baseflow separation [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):82-88. (in Chinese))
- [74] 刘俊杰,高峰,刘翠善,等. 基于集对分析的清流河流域蓝绿水分类分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):95-103. (LIU Junjie, GAO Feng, LI Cuishan, et al. Classification analysis of blue and green water based on set pair analysis in the Qingliu River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 95-103. (in Chinese))
- [75] 谢飞,王文圣. 集对分析在汛期分期中的应用研究[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(1):60-63. (XIE Fei, WANG Wensheng. Set pair analysis and its application to the division of flood period [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science &Technology, 2011,9(1):60-63. (in Chinese))
- [76] 汪哲荪,金菊良,魏一鸣,等. 三角模糊数随机模拟的防洪工程联系数风险评价模型[J]. 水利学报,2010,41(10):1173-1178. (WANG Zhesun, JIN Juliang, WEI Yiming, et al. Connection number based risk evaluation method for watershed flood control engineering system using stochastic simulation and triangular fuzzy numbers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (10): 1173-1178. (in Chinese))
- [77] 金菊良,吴开亚,李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报,2008,39(11):1257-1261. (JIN Juliang, WU Kaiya, LI Ruzhong. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (11): 1257-1261. (in Chinese))
- [78] 金菊良,赵伟,周戎星,等. 联系数随机模拟模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(4):11-19. (JIN Juliang, ZHAO Wei, ZHOU Rongxing, et al. Application of random simulation model of connection number in the evaluation of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43 (4): 11-19. (in Chinese))
- [79] 金菊良,沈时兴,酆建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39 (1): 1-9. (in Chinese))
- [80] 赵伟,王平,金菊良,等. 水资源承载力评价的三元减法集对势模糊数随机模拟方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(1):26-33. (ZHAO Wei, WANG Ping, JIN Juliang, et al. Three-element subtraction set pair potential fuzzy number stochastic simulation method of water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43 (1): 26-33. (in Chinese))
- [81] 周铁军,李征,袁康,等. 基于半偏减法集对势三角模糊数随机模拟方法的水资源承载力评价[J]. 水资源与水利工程学报,2023,34(2):33-41. (ZHOU Tiejun, LI Zheng, YUAN Kang, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on semipartial subtraction set pair potential triangular fuzzy number stochastic simulation method [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34 (2): 33-41. (in Chinese))
- [82] 赵齐雅,金菊良,崔毅,等. 区域旱灾风险评估与诊断的动态差异系数模糊数随机模拟方法[J]. 灾害学,2024,39(1):195-201. (ZHAO Qiya, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Stochastic simulation method of fuzzy number of dynamic difference coefficient for regional drought risk assessment and diagnosis[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39 (1): 195-201. (in Chinese))
- [83] 石询询,金菊良,吴成国,等. 整体偏联系数与随机模拟耦合的水资源承载力评价方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):53-62. (SHI Xunxun, JIN Juliang, WU Chengguo, et al. Evaluation method of water resource carrying capacity coupled with overall partial connection number and stochastic simulation[J]. Journal of North China University of Water Resources and

- Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 53-62. (in Chinese))
- [84] 赵克勤. 集对分析在系统智能预测中的应用综述[J]. 智能系统学报, 2022, 17(2): 233-247. (ZHAO Keqin. Application overview of set pair analysis in intelligent prediction system [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(2): 233-247. (in Chinese))
- [85] 王国强. 不确定性理论: 集对分析在 MOS 概率天气预报中的应用[J]. 浙江气象科技, 1999, 20(1): 3-8. (WANG Guoqiang. Uncertainty theory: application of set pair analysis in MOS probabilistic weather forecasting[J]. Zhejiang Meteorological Technology, 1999, 20(1): 3-8. (in Chinese))
- [86] 王国强, 赵克勤, 郑选军. 天气预报多元回归模型中模糊因子的集对分析[J]. 科技通报, 2004, 20(2): 151-155. (WANG Guoqiang, ZHAO Keqin, ZHENG Xuanjun. Application of set pair analysis to fuzzy predictors of multiple regression weather forecast models[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(2): 151-155. (in Chinese))
- [87] 冯利华, 张行才, 龚建林. 基于集对分析的水资源变化趋势的统计预测[J]. 水文, 2004, 24(2): 11-14. (FENG Lihua, ZHANG Xingcai, GONG Jianlin. Statistical forecast of change tendency of water resources based on the set pair analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(2): 11-14. (in Chinese))
- [88] 蒋尚明, 金菊良, 袁先江, 等. 基于近邻估计的年径流预测动态联系数回归模型[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7): 5-9. (JIANG Shangming, JIN Juliang, YUAN Xianjiang, et al. Nearest neighbor estimate based dynamic connection number regression model for predicting annual runoff[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(7): 5-9. (in Chinese))
- [89] 金菊良, 魏一鸣, 王文圣. 基于集对分析的水资源相似预测模型[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 72-77. (JIN Juliang, WEI Yiming, WANG Wensheng. Set pair analysis based on similarity forecast model of water resources[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 72-77. (in Chinese))
- [90] 郭彦, 金菊良, 梁忠民. 基于集对分析的区域需水量组合预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 42-45. (GUO Yan, JIN Juliang, LIANG Zhongmin. Combined prediction model for regional water demand based on set pair analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 42-45. (in Chinese))
- [91] 李辉, 卞锦宇, 周婷, 等. 基于联系数的区域水资源承载力诊断指标组合预测研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 18-23. (LI Hui, BIAN Jinyu, ZHOU Ting, et al. Combination forecast model based on connection number for diagnosis index of water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 18-23. (in Chinese))
- [92] 李凡修, 辛焰, 陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(6): 10-11. (LI Fanxiu, XIN Yan, CHEN Wu. Set pair analysis method of water quality eutrophication assessment of lakes [J]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(6): 10-11. (in Chinese))
- [93] 吴开亚, 金菊良, 潘争伟. 基于三角模糊数截集的联系数模型在城市涝灾影响等级评价中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 711-719. (WU Kaiya, JIN Juliang, PAN Zhengwei. Set pair analysis model based on triangle fuzzy intervals and its application to impact rating evaluation of urban flood[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 711-719. (in Chinese))
- [94] 王红芳, 丁晶, 王文圣, 等. 集对分析在频率曲线拟合度定量评价中的应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 1-3. (WANG Hongfang, DING Jing, WANG Wensheng, et al. Application of SPA to quantitative evaluation on fitting of frequency curve[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(4): 1-3. (in Chinese))
- [95] 吴啸骏, 吴成国, 秦广虎, 等. 基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价[J]. 水利水运工程学报, 2024(3): 62-71. (WU Xiaoqin, WU Chengguo, QIN Guanghu, et al. Evaluation scheme and application of regional water resources carrying capacity based on heat transfer subtraction set pair potential [J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(3): 62-71. (in Chinese))
- [96] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [97] 王平, 周亮广, 金菊良, 等. 基于集对分析的区域水利高质量发展评价方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 52-62. (WANG Ping, ZHOU Lianguang, JIN Juliang, et al. Evaluation method for high-quality development of regional water conservancy based on set pair analysis[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 52-62. (in Chinese))
- [98] 周亮广, 金菊良, 周玉良, 等. 基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 118-125. (ZHOU Lianguang, JIN Juliang, ZHOU Yuliang, et al. Matching of agricultural water and soil resources in Jianghuai Hilly Area based on set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 118-125. (in Chinese))
- [99] 金菊良, 徐新光, 崔毅, 等. 基于联系数和洛伦兹曲线的

- 水资源空间均衡评价方法[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 387-395. (JIN Juliang, XU Xinguang, CUI Yi, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation method based on connection number and Lorenz curve [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 387-395. (in Chinese))
- [100] 金菊良, 张浩宇, 宁少尉, 等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 1-8. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 1-8. (in Chinese))
- [101] 周戎星, 金菊良, 崔毅, 等. 基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 73-78. (ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Drought risk analysis model based on confidence interval estimation of connection number set pair potential [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 73-78. (in Chinese))
- [102] JIN Datang, ZHOU Ting, YANG Xiaohua, et al. Assessment of regional water resource carrying capacity by the connection number of set pair analysis [J]. Thermal Science, 2024, 28(3A): 2287-2294.
- [103] 刘秀梅, 赵克勤, 王传斌. 基于联系数的三角模糊数多属性决策新模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 2399-2403. (LIU Xiumei, ZHAO Keqin, WANG Chuanbin. New multiple attribute decision-making model with triangular fuzzy numbers based on connection numbers [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(10): 2399-2403. (in Chinese))
- [104] 刘秀梅, 赵克勤. 基于集对分析联系数的信息不完全直觉模糊多属性决策[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(1): 67-77. (LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attribute decision making with the incomplete information and intuitionistic fuzzy number based on the connection number of set pair analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(1): 67-77. (in Chinese))
- [105] 陆广地. 联系数均分定理在模糊群决策中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(22): 10-17. (LU Guangdi. Fuzzy group decision making based on the fuzzy group decision making with uncertain degree of contact num [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(22): 10-17. (in Chinese))
- [106] 张斐. 集对分析方法在多属性决策问题中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [107] 赵克勤. 基于集对分析的不确定性多属性决策模型与算法[J]. 智能系统学报, 2010, 5(1): 41-50. (ZHAO Keqin. Decision making algorithm based on set pair analysis for use when facing multiple uncertain attributes [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5(1): 41-50. (in Chinese))
- [108] 王万军. 基于集对逻辑的推理[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2005, 19(3): 15-16. (WANG Wanjun. Inference based on set pair logic [J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences), 2005, 19(3): 15-16. (in Chinese))
- [109] 张峻瑜. 集对逻辑探索[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2004, 18(3): 20-21. (ZHANG Junyu. Exploration of set pair logic [J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences), 2004, 18(3): 20-21. (in Chinese))
- [110] 黄德才, 赵克勤, 陆耀忠, 等. $a+bi+cj$ 型联系数的四则运算及其应用[J]. 机电工程, 2000, 17(3): 81-84. (HUANG Decai, ZHAO Keqin, LU Yaozhong, et al. The fundamental operation of arithmetic on connection number $a+bi+cj$ and its application [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2000, 17(3): 81-84. (in Chinese))
- [111] 赵克勤, 黄德才, 陆耀忠. 基于 $a+bi+cj$ 型联系数的网络计划方法初探[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(2): 29-31. (ZHAO Keqin, HUANG Decai, LU Yaozhong. A new network planning method based on the connection number $a+bi+cj$ [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(2): 29-31. (in Chinese))
- [112] 成科扬. 基于集对分析的模糊逻辑研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(增刊1): 210-213. (CHENG Keyang. Research in fuzzy logic on set pair analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(Sup1): 210-213. (in Chinese))
- [113] 王万军. 基于集对逻辑与不确定集对分析的应用[J]. 周口师范学院学报, 2009, 26(2): 38-40. (WANG Wanjun. The application of set pair logic and uncertain set pair analysis [J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2009, 26(2): 38-40. (in Chinese))
- [114] 王霞, 彭晓华. 集对分析中联系数的运算及其应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(2): 275-276. (WANG Xia, PENG Xiaohua. Fundamental operation of arithmetic on connection number and its application in set pair analysis [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(2): 275-276. (in Chinese))
- [115] 杨亚锋. 集对逻辑及其运算定律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(2): 249-252. (YANG Yafeng. Set pair logic and its operation theorems [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(2): 249-252. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 王芳)