

文章编号: 0559-9350(2025)01-0020-12

水资源集对分析方法理论与应用研究进展

金菊良¹, 周亮广^{1,2}, 崔毅¹, 吴成国¹, 周戎星³, 张礼兵¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000;

3. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 集对分析方法应用同、异、反一分为三辩证思维, 处理水资源复杂系统不确定性问题具有独特优势, 已成为定量计算与物理解析水资源不确定性问题的重要前沿和研究热点。针对有些集对分析方法的物理解析不清晰、计算公式不统一等问题, 结合文献计量分析, 系统总结了近 25 年来水资源集对分析方法理论和应用研究进展。结果表明: (1) 水资源集对分析方法历经移植、耦合、创新三个发展阶段, 移植期发展较为缓慢, 耦合、创新期中偏联系数、减法集对势等新的伴随函数方法推动水资源集对分析方法不断快速发展。(2) 水利、资源和环境科学是目前集对分析方法研究的主要领域, 水资源问题综合评价为主要研究热点。(3) 伴随函数中减法集对势快速发展为相对独立的重要方向, 并与偏联系数、半偏联系数等方法耦合出一系列水资源集对分析新方法, 而高阶偏联系数计算、联系熵物理内涵等系列问题仍未形成共识, 邻联系数的研究还较少。(4) 目前水资源集对评价是热点研究领域, 集对预测仍以单要素预测为主, 集对决策仍属系统评价范畴, 量化决策和推理模型研究不足。由此, 对集对推理等水资源集对分析方法发展趋势进行展望, 以期水资源复杂系统不确定性分析、结构水资源学等发展提供辩证思维和理论方法。

关键词: 水资源集对分析方法; 集对系统; 同异反关系; 一分为三; 辩证关系; 集对势; 偏联系数; 半偏联系数

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240246

1 研究背景

连接地球表层五大圈层的水资源系统是水资源利用与经济社会发展和生态环境保护各要素相作用形成的复杂系统^[1], 人类活动和气候变化的叠加作用使得水资源与能源、粮食和生态系统之间的作用关系更趋复杂, 水资源安全保障日趋严峻^[2]。从系统结构角度探析水资源系统内部要素间、水资源系统与环境间的结构关系及关系间的作用与转化是水资源系统工程研究的重要前沿^[3-4], 这些结构关系反映事物普遍联系, 符合对立统一的辩证发展规律^[5]。一切事物都以一分为三的方式对立统一地存在、联系和运动发展^[6], 一分为三理论作为事物产生、发展和运动的普遍规律, 是分析和解决问题的基本方式方法^[7]。基于此, 赵克勤^[8]先生认为应采用系统科学的研究思路探讨系统不确定性的复杂性, 于 1989 年提出了系统不确定性分析理论——集对分析(Set Pair Analysis, SPA), 其核心思想是将确定性与不确定性作为同一个系统的组成部分, 采用同、异、反三种关系一分为三地构建联系数来模拟事物关联属性的辩证关系结构^[9], 定量分析表征确定性与不确定性之间关系结构及其相互转化^[5]。

由于联系的普遍性, 水资源复杂系统中存在大量集对现象。结合水资源问题确定研究目标, 模拟辩证关系结构, 识别构建水资源问题集对, 并就集对事物关联属性进行一分为三的同时性、差异性和

收稿日期: 2024-04-28; 网络首发日期: 2025-01-02

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20250102.1002.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240223, 52109009); 安徽省自然科学基金项目(2208085US03, 2308085US06)

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

通信作者: 崔毅(1990-), 博士, 讲师, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: ycui@hfut.edu.cn

对立性的全面辩证分析,进一步用联系数及其伴随函数实现对水资源复杂系统各种水问题的不确定性定量分析方法称为水资源集对分析方法^[3]。与传统的水资源统计分析、水资源系统评价等方法主要从宏观层次反映变量间统计关系和模糊关系相比,水资源集对分析方法可以从宏观和微观两个层次反映水资源要素间的关系结构,可用于水资源要素关系分析、水资源分类分级^[3]、水资源预测^[10]、水资源评价^[11]及决策等不确定性问题研究^[12-14],具有全面精细、直观简便等优势。近年来,水资源集对分析方法发展迅速,提出了集对分析联系数的集对势、偏联系数等不同伴随函数新方法,成功应用于水资源承载力^[15-17]、水资源空间均衡^[18-19]、水旱灾害风险^[20-21]、水资源安全^[22-23]、水利高质量发展^[24-25]等领域。水资源集对分析方法模拟对立统一的辩证关系结构,可从同、异、反三方面全面刻画集对的关系程度,联系数伴随函数又可深入挖掘同异反联系分量间相互作用和转化关系,显著拓展了联系数的理论研究和实践应用领域。目前集对分析已与随机、模糊、未确知、灰色分析共同组成当前水资源不确定性分析的主要方法^[3]。

集对分析自1989年提出以来迄今36年,发展历史相对较短。模拟辩证关系结构的水资源集对分析研究始于1998年,发展历史更短。近年来水资源集对分析发展迅速,涌现出许多水资源集对分析新方法,同时也出现了部分方法中核心概念不统一、计算过程的物理解析不清晰、计算公式不统一甚至可能存在错误等问题,集对分析的基础理论和实践经验目前仍相对薄弱,这大大限制了集对分析自身及其在水资源领域的深入发展。为此,本文系统梳理模拟辩证关系结构的水资源集对分析研究的发展脉络,全面分析总结集对势、偏联系数、邻联系数、联系熵、耦合伴随函数等水资源集对分析方法,以及这些方法在水资源集对分析、评价、预测、决策等方面的应用研究进展和发展趋势,以进一步推动基于辩证关系结构的水资源集对分析方法理论与应用的深入发展。

2 水资源集对分析方法研究整体状况的文献计量分析

选择CNKI数据库以“集对分析”和“水资源”为主题词,对1989—2023年数据进行篇关摘高级检索和筛选,得到相关文献429篇,但最早文献为1998年^[26],因此统计分析自1998年开始。选取WOS核心数据库,以“Topic=(‘set pair analysis’和‘water resources’)”对2003年(作者学校购买了WOS库2003年后的数据)至2023年数据检索到文献138条,筛选相关论文125篇。结合文献计量分析可得:水资源集对分析方法研究历经移植、耦合、创新三个阶段:1998—2004年为集对分析方法移植研究阶段,自2000年联系数同异反联系分量分段函数取值方法^[27]提出后,集对分析逐渐引入水资源研究领域,前期发文量较少,发展缓慢;2005—2017年为集对分析方法耦合研究阶段,2005年偏联系数方法的提出^[28]推动了水资源集对分析方法进入快速发展阶段,集对分析与水资源分析计算、评价、预测方法耦合的发文量出现了明显增长;2018年至今为水资源集对分析方法创新研究阶段,2018年减法集对势^[15]、2021年半偏减法集对势^[16]的提出及在水资源问题中的应用推动了水资源集对分析方法研究和应用进入新一轮高速发展阶段。水资源集对分析方法研究当前的整体发展趋势与减法集对势、偏联系数等伴随函数方法研究的快速发展密切相关。

总体上,CNKI库发文量明显高于WOS库,两者总体趋势相类似,水资源集对分析方法研究成果逐渐被国际期刊所报道。水资源集对分析发文的学科方面,在CNKI数据库中主要为水利水电工程、资源科学和环境科学,占比超过80%;而在WOS库中,Environment Science、Ecology、Water Resources和Engineering等学科发文最多,占比接近60%。水资源集对分析关键词主要集中在水安全、水质、水资源承载力等主题,同时各主题间又存在明显相互交叉,模糊关系关键词渗透其中,系统评价是集对分析在目前水资源研究领域中最广泛的应用领域,水资源集对分析中同异反模糊关系分析与处理是研究的重要方向,集对分析向国际推广还有较大空间。

3 水资源集对分析方法理论研究进展

水资源集对分析方法的理论研究主要围绕联系数的伴随函数展开,在CNKI数据库中分别以“集

对势”“偏联系数”“联系熵”“邻联系数”这些伴随函数为主题开展检索，进一步筛选水资源与相应伴随函数的参考文献，并进行关键词分析。结果表明：近年来水资源集对分析伴随函数中集对势和偏联系数研究发展较快，成果丰富；减法集对势自 2018 年提出以来快速成为水资源集对分析的相对独立分支，目前已发展出半偏减法集对势、热力学减法集对势等多种集对势方法；偏联系数已发展出效应全偏联系数、半偏联系数等方法；联系熵方法目前尚不成熟、研究较少且相对独立；邻联系数的研究更少；水资源集对分析伴随函数现有研究主要集中于水资源承载力、旱灾风险、地下水开采、水质等主题的综合评价、趋势分析预测、诊断识别等领域，其中水资源承载力是当前研究的热点。可见，联系数伴随函数旨在处理联系数中的差异不确定性，以定量刻画集对的关联属性，实现同异反联系项之间的相互转化；集对势与偏联系数是当前联系数伴随函数最主要的研究方向；集对势与偏联系数等耦合成新的伴随函数将是今后重要的发展方向；联系数伴随函数在水资源等实际问题的广泛应用验证中得到了进一步改进、完善和发展。

结合前述联系数伴随函数主要发展方向，为不断深化对不同水资源集对关联属性的不确定性进行客观承认、系统描述、定量刻画确定联系数、构建相应的水资源集对分析方法的研究经验^[5]，以下重点从联系数同异反关系形成确定、集对势、偏联系数、邻联系数、联系熵及耦合伴随函数方面对水资源集对分析方法的理论研究进展进行阐述。

3.1 水资源集对联系数确定方法 联系数同异反关系的确定是定量集对分析的基础，在水资源集对分析方法研究中，结合水资源变量及其对立关系^[29]，联系数 $a+bi+cj$ ^[5] 各分量主要有以下不同取值方式：

(1) 针对离散统计数据的水资源变量，可以统计水资源集对所包含的特征数，从同、异、反三方面进行分类统计，例如黄河陕县站（三门峡西站）与长江宜昌站年径流量丰平枯关系分析、年径流丰枯分类^[31]。

(2) 有明确等级划分的水资源变量，可将水资源及其相关影响因子的集对变量按其分级标准范围进行等级划分，用与等级数目相应元数的联系数进行集对分析^[30]。如径流量可分成特枯、枯、中、丰和特丰 5 级，采用均值标准差法分别按区间等分划分级别；如果水资源样本值落在同一等级，则记为同 a ，与其相差 1 级为差异一，记为 b_1 ，相差 2 级为差异二，记为 b_2 ，相差 3 级为差异三，记为 b_3 ，相差 3 级及以上为对立，记为反 c ，据此可构建五元联系数来表达水资源变量的变化特征^[31]。

(3) 对于连续分布的水资源变量，亦可根据水资源变量的临界变化特征用分段函数结构表征联系数的同异反关系。各评价指标样本和相应指标的评价等级标准构成一个集对。如果样本的指标值落在某个特定的评价等级内，那么该样本与这一等级被视为同，联系数取值为 1；若指标值落在相隔等级，就视为反，联系数取值为 -1；若指标值落在相邻等级，则视为异，差异度系数 i 在 $[-1, 1]$ 区间取值变化，越靠近同一等级， i 越接近 1，反之， i 相应越接近 -1^[27]。例如湖泊富营养化分级^[27]、水资源承载力分级^[15]。在五元或更多元的联系数中，这样计算的单指标联系数在转化为隶属度及计算联系分量时可能会出现多个零值问题，文献[32]提出取相隔两个及以上等级为反，以缩短对立关系取值区间、减缓相邻两个等级的斜率，进一步丰富样本值与评价等级标准间联系数的物理意义^[32]。

(4) 面向变量间作用关系对联系数同异反进行取值。可将水资源变量与其相互联系的变量的某种作用关系构建为一个评价指标，与相应的评价等级标准构成集对，将指标样本值处在某评价等级中、落在相邻等级和相隔等级分别定义为同、异、反关系进行量化计算。例如水资源总量 y_i 为因变量，耕地面积 x_1 、人口数量 x_2 和第二产业 GDP x_3 等变量 x_j 为自变量，运用基尼系数将两变量间的匹配关系 Z_{ij} ($y-x_1$ 、 $y-x_2$ 、 $y-x_3$) 组成为评价指标，构建新变量 Z_{ij} 与基尼系数等级的集对，实现各子区域水资源空间均衡的定量评价^[18]。

3.2 水资源集对势方法 为度量联系数所反映的集对事件关联属性的整体发展联系趋势，赵克勤^[5]提出用 a/c 表征集对事件这种联系趋势。目前集对势已发展出多种形式，根据集对势表达式的结构差异可分为除法集对势^[5]、指数集对势^[33]、减法集对势^[15]等，其主要差异对见如表 1。可见，除法集对势、指数集对势、减法集对势三种形式的集对势围绕反映 2 个集合在指定问题背景下某种联系趋势的基本内涵，在集对势原定义的基础上不断改进。除法集对势中未体现差异度项 bi 的影响，且受 $c \neq 0$

的约束，在 c 接近于 0 时，会导致差异很小的联系数，计算得出的集对势值差别很大，甚至趋于无穷大，在实际应用中遇到困难；指数集对势克服了除法集对势分母为 0 的不足，但量纲性质和数量变化范围及联系数本意发生变化；减法集对势又作了进一步改进，保持了联系分量量纲性质和数量级变化，取值范围 $[-1, 1]$ ，与联系数本意一致，直观反映联系数整体宏观相对确定性发展趋势，在水资源承载力评价及诊断^[15,34]、水资源承载力空间均衡评价^[19]、旱灾风险评估^[35]、水资源复杂系统协调发展^[36]等领域得到应用。同时，与物理学中万有引力原理相结合构建出引力减法集对势^[37]，与物理学热传递理论相结合，构建基于热传递减法集对势^[38]等。可见，减法集对势克服了除法集对势和指数集对势的主要不足，且计算简便，能直观反映联系数本意和集对事件关联程度整体发展趋势，在水资源领域得到快速发展和广泛应用。

表 1 三元联系数集对势类型对比

序号	集对势类型	基本表达式	主要优势	主要不足
1	除法集对势	$shi(H) = a/c$	集对势原定义，由 a, b, c 相对大小细化集对势级别	c 接近 0 时，集对势趋于无穷大，实际应用受到约束
2	指数集对势	$shi(H)_e = e^{a-c}$	克服了除法集对势分母为 0 的不足	改变了原联系分量 a, b, c 的量纲性质和数量变化关系，区间范围变为 $[1/e, e]$
3	减法集对势	$shi(H)_s = (a-c)/(1+b)$	克服了原集对势分母为 0 的不足，保持了联系分量量纲性质和数量级变化	不同元数的联系数减法集对势公式需进行进一步推算

3.3 水资源偏联系数方法 联系数是同异反不同等级关系相互联系相互作用的不确定性结构函数，从辩证发展角度看这些等级之间可相互转化。基于此，赵克勤^[28]提出了偏联系数，可定量计算同异反联系分量从一个关系等级发展到相邻等级的变化率。对于三元联系数 $a+bi+cj$ ，假定当前状态“同”是从“异”发展而来，这种发展趋势的倾向程度可用 $\partial a = a/(a+b)$ 表示；同理，从反到异的发展倾向可用 $\partial b = b/(b+c)$ 表示。由此可得反映研究对象正向发展趋势的偏正联系数 $\partial^+ \mu$ ，反映研究对象负向发展趋势的偏负联系数 $\partial^- \mu$ ^[28]，偏正、偏负联系数之效应和构成全偏联系数、代表集对系统由过去到当前联系状态演化进程的综合发展趋势^[28,39]。偏联系数描述的是同一集对关系程度的同异反关系间相互辩证转换，一般用于刻画联系分量间的相互转化和集对发展趋势^[15]，目前有全偏联系数、半偏联系数。

全偏联系数可刻画各联系分量在微观层次上的正向和负向迁移的矛盾运动，表征集对事件联系程度矛盾运动的方向和强度^[28,39]，可反映集对事件中同异反状态变化、判断集对事件发展趋势。目前，全偏联系数的计算公式尚未统一，常见的代表性计算式主要有以下三类：覃杰等^[40]把差异度系数 i 分为 i^+ 与 i^- ，系数 i^- 由 $b/(a+b)$ 位置调整到 $c/(b+c)$ 的位置，剔除了示性系数 j ，代替为偏正联系数与偏负联系数的差值来表示全偏联系数，与原偏联系数含义有明显偏差；陆广地等^[41]也把 i 分为 i^+ 与 i^- ，同时考虑了示性系数 j 的影响，但对偏负联系数的 i^- 正、负取值作用考虑不足；金菊良等^[42]充分结合偏正联系数的内涵，对比给出偏负联系数的含义，提出了效应全偏联系数，参考偏正联系数及其正效应，区分了偏负联系数的负效应^[5]，差异度系数分别按正效应和负效应相应地取正值和负值，并与减法集对势进行随机模拟比较，结果显示两者误差非常小，认为效应全偏联系数作为三元联系数的全偏联系数计算公式更为稳健和合理，已在水资源承载力评价等问题中得到应用^[42]。除三元偏联系数外，还可相应扩展至更多元的偏联系数，甚至从一阶向二阶和更高阶偏联系数拓展^[43]。但目前，高阶偏联系数发展缓慢，一方面从一阶向更高阶偏联系数拓展的理论支持不足，缺少其物理内涵的解析；另一方面，高阶全偏联系数计算式尚存在很大争议，其计算值的含义、验证途径及实际应用支撑都比较单薄，无疑限制了高阶偏联系数的发展。可见，目前关于偏联系数的计算表达式及其内涵尚未达成共识^[3,44]，联系分量演化前后的含义、偏正与偏负联系数计算式中差异度系数的含义，低阶差异度系数与高阶偏联系数的关系、各阶全偏联系数计算值的含义等关键问题尚未完全统一认识，全偏联系数的验证途径较少，高阶偏联系数的理论研究和验证途径更显不足，偏联系数的研究还有待通过基本内涵剖析与定量计算甚至实际应用问题验证相结合的计算思维途径深入研究。

半偏系数能够体现微观层面上各同、异、反联系分量间的相互联系相互转换及矛盾运动,实现联系分量辩证关系的动态演化分析。三元联系数 $a+bi+cj$ 的半偏正联系数^[16,45] ∂^+a 认为是当前的 a 从 b 层次朝同一度方向迁移过来, ∂^+b 认为是当前的 b 从 c 层次朝差异度方向迁移过来^[28], 类似地可得联系数分量 a 、 b 的半偏负联系数^[16,45]。半偏系数可分析水资源集对间联系分量间的迁移转化,使修正计算后水资源联系数能够更准确更稳健地刻画水资源现象的变化规律,已用于水资源承载力评价^[17,46]、旱灾风险评估^[47]等研究。

3.4 水资源邻联系数方法 上述偏联系数的理论假设是把当前状态视为历史状态的发展结果对整体态势进行分析,基于同异反联系分量不同等级关系之间的相互作用与辩证转化,哈丽阳等^[48]假定三元联系数中当前状态 a 对当前状态 b 起正向促进作用,用 a/b 表示,同理可用 b/c 表示当前状态的 b 对 c 的促进作用,据此构造邻联系数。刘秀梅等^[49]提出三元联系数的邻左、邻右和全邻联系数的计算式,以此来刻画对未来状态的趋势预测。孙爱峰等^[50]将邻联系数修正为邻正联系数和邻负联系数,可实现邻联系数的定量计算。在此基础上,李琪琪^[51]也相应地提出了五元全邻联系数用于风险趋势评估。但上述邻联系数计算式中均存在当分母接近于 0 时全邻联系数及其相关伴随函数均无法定量确定的问题,集对事件趋势判断分析上还需要再对照趋势表,但同时又会导致其结果无法与其他计算结果进行统一排序等问题^[52]。为此,金菊良等^[53]提出了用同一度、差异度和对立度的差值作为增量,构建正向驱动系数和负向驱动系数,提出了减法全邻联系数,解决了差异度 b 为零的计算问题,通过减法全邻联系数的变化量,可直观判断集对的发展趋势,使全邻联系数具备更广阔的应用空间,已应用于区域水资源承载力的评价^[45]。目前,邻联系数的研究报道还较少,计算式也未达成统一认识,应用中需进一步明确其内涵及其与偏联系数、集对势等其它伴随函数的关系,在统一内涵基础上,构建相对明确统一的表达式,再进行应用验证。

3.5 水资源联系熵方法 对 n 个集对系统的同异反关系进行度量时,赵克勤^[54]参考信息熵的概念,引入联系熵进行不确定性问题的量化计算分析,联系熵由同熵 S_a 、异熵 S_b 和反熵 S_c 组成,联系熵旨在表征集对事件同异反特性及其联系性。王栋^[55]提出广义联系熵,与联系熵相比,直接用同一度、差异度和对立度值类比事件发生概率进行信息熵计算,在水环境评价研究中进行应用。金菊良等^[52,56]基于当前联系熵中同熵、异熵、反熵应用其物理内涵不够清晰,对同异反关系结构信息反映不足,提出三元联系数的联系熵的应用形式,计算结果与平均联系数评价结果相近,趋势一致,验证了其合理性,并应用于水资源承载力评价^[56]、水资源优化配置^[57]等研究。此外,在联系熵基础上,朱其秀^[58]结合联系分量 a 、 b 、 c 的大小关系及除法集对势的含义,以联系分量平均值的大小关系来刻画态势,引申出同异反态势熵。韦琦等^[59]将联系熵与系统脆性分析相结合,定义了包含脆性同一熵、波动熵、对立熵的系统脆性联系熵。李言等^[60]提出利用集对同熵、反熵、异同熵和异反熵来量化三支决策的不确定性。吴成国等^[61]提出有序度熵与联系数相结合的水资源空间均衡综合评价方法,可为区域水资源空间均衡决策提供参考。

目前,联系熵中同熵、异熵、反熵在反映同异反结构方面的物理内涵尚不统一,在不同应用中出现一些不同的联系熵概念,需进一步明确能清晰反映集对事件内部同异反不确定性及整体有序发展的物理内涵,构建相对统一的具有物理解析的联系熵概念体系。

3.6 水资源联系数伴随函数耦合方法 集对势与偏联系数是当前研究水资源联系数伴随函数的两个主要方向,两者耦合可以把联系分量间微观动态变化与联系数宏观发展趋势相结合,全面反映联系分量间的辩证运动和联系趋势。近年来这两个伴随函数相耦合相继发展出一些新的联系数耦合伴随函数。

3.6.1 减法集对势与半偏联系数的一次耦合 减法集对势的原计算式直接用联系分量的比例取值法,将不确定性的差异度项 bi 转化到确定性的同一度项 a 和对立度项 cj ,而应用半偏联系数可在微观层面实现联系分量之间的相互迁移和转化。将减法集对势与半偏联系数进行一次耦合,按半偏联系数的思想,将不确定项 bi 按照半偏联系数 $a/(a+b)$ 的比例转化到 a 上、按 $c/(b+c)$ 的比例转化到 c 上,金菊良等提出了三元联系数的半偏减法集对势^[16],其取值范围仍是 $[-1, 1]$,保持了原联系分量的量纲性质和数量级变化关系,与三元减法集对势的平均误差仅为 1.1%,合理可行,便于解释联系分量间的转

化关系。同理可扩展到五元^[32,62]、七元半偏减法集对势^[63]的构造和计算,目前已应用于旱灾风险、水土资源耦合等评价问题。但也发现,三元以上的减法集对势会存在差异度系数的经验取值问题,仍需进一步探讨客观、动态处理差异度系数的取值问题。

3.6.2 减法集对势与半偏联系数的多次耦合 针对三元以上联系数的减法集对势及半偏减法集对势计算过程中差异度系数需经验取值问题,袁康等^[64]采用半偏联系数,先将不确定项 b_1 和 b_3 分别按 $a/(a+b_1)$ 、 $c/(b_3+c)$ 转化到 a 和 c ,再将 b_1 和 b_3 的剩余部分 $b_1-a/(a+b_1)$ 、 $b_3-c/(b_3+c)$ 半偏到 b_2 ,通过两次耦合半偏联系数的方法将 b_1 和 b_3 两个不确定项进行转化,形成类似三元联系数减法集对势形式的二次半偏减法集对势;汪洁等^[65]考虑用半偏联系数方法先将差异度 b_2 转化到 b_1 和 b_3 上,再继续用半偏联系数将更新后的偏同差异度“ $b_1+b_2b_1/(b_1+b_2)$ ”和偏反差异度“ $b_3+b_2b_3/(b_3+b_2)$ ”分别转化到同一度 a 和对立度上 c ,提出五元联系数的连续半偏减法集对势;金菊良等^[66]在连续半偏减法集对势的基础上,充分考虑联系数中所有不确定项之间的相互转化,除考虑 b_2 向 b_1 和 b_3 转化外,还考虑 b_1 和 b_3 之间的转化,构造了演化半偏联系数 $b_1/(b_1+b_2+b_3b_2/(b_2+b_3))$,得到 b_3 转化到不相邻的联系分量 b_1 的计算式为 $[b_3b_2/(b_2+b_3)][b_1/(b_1+b_2+b_3b_2/(b_2+b_3))]$,构建了五元联系数连续演化半偏减法集对势。

通过对以上耦合半偏联系数与减法集对势的新集对势计算式分析可知,耦合后的半偏减法集对势函数比传统减法集对势在表征联系分量转化关系上更具解释性;二次半偏减法集对势和连续半偏减法集对势又从不同角度利用相邻联系分量之间的转化关系,解决了半偏减法集对势仍存在差异度系数的经验取值问题;连续演化半偏减法集对势进一步充分挖掘联系分量的现有取值及相邻、不相邻联系分量间关系的信息,更完整地体现了联系数各联系项相互转化关系。可见,交叉应用多种伴随函数,有助于揭示同异反关系的辩证演化特征、提高联系数方法的适用性,已在水资源趋势分析、综合评价、灾害风险评估等领域得到应用验证。

4 水资源集对分析方法应用研究进展

在CNKI数据库中分别以“水资源”与“集对分析”“预测”“评价”和“决策”为主题词进行高级检索,进一步筛选水资源与相应伴随函数的参考文献,剔除最高频的“集对分析”,并整理联系过低的主题词,进行关键词分析,结果表明在水资源集对分析方法应用研究中主要热点依次有:水资源评价方面,其核心词出现最多,相互联系也最为密切,包括水资源承载力评价、水质评价、风险评估、脆弱性评价、可持续发展评价等领域,联系数、集对势、偏联系数、熵等方法广泛应用其中;水资源预测方面,其核心词分布较为分散,出现预测、聚类预测、水资源预测、径流预测、预测评价等核心词,相互联系较小,主要为水资源单要素预测;水资源分析计算方面,其核心词分布较为零散,出现径流丰枯分类、水文相关分析、相似流域选择等;水资源决策方面,核心词较少,出现多属性决策、方案优选和方案评价等核心词,基本属于以方案为评价对象的综合评价的对比排序。以下按水资源系统分析的顺序,分别对水资源集对分析计算、预测、评价和决策分析方法的应用研究进展进行简要阐述。

4.1 水资源集对分析计算 面向水文统计的水资源分析计算^[30]是水资源评价、预测及决策分析的基础。目前,集对分析方法在水资源相关关系分析、径流丰枯分类、流域汛期分期、径流状态时序变化、水资源系统相似性选择等水资源分析计算领域取得了许多成果。水资源相关分析是寻找水资源变量间关系及选择水资源影响要素的基本方法,朱兵等^[67]在分析洪峰流量关系时将联系度、相关系数、模糊隶属度和灰色关联度进行比较,发现各指标反映的水文变量相关性一致,集对分析联系度更完整地刻画变量间相互关系结构;王文圣等^[68]提出用联系度来刻画水文变量在正、负及不确定性三方面的相关关系微观结构。径流丰枯分类可为水资源利用和保护提供更好支撑,王文圣等^[31]充分考虑径流的大小及年内分配,提出用联系数进行径流丰枯分类,方法简便;郑威等^[69]将投影寻踪方法与集对分析耦合,丰枯分类结果较传统方法更为客观。汛期分期方面,谢飞等^[70]提出用集对分析进行汛期分期的计算方法,徐泗鑫等^[71]用减法集对势判别汛期时间域。在相似流域选择方面,邓红霞等^[72]提出用联

系数同、异、反三方面表示设计流域与参证流域的相似度，量化选择相似流域。可见，集对分析方法在水资源分析计算不同方面开展了大量研究，不断拓展水文水资源应用领域。

4.2 水资源集对预测 水资源预测涉及水循环、水资源供需、生态环境变化等诸多复杂要素的推测。水资源系统作为融合气象、水文、下垫面与人类活动等的复杂系统，普遍存在如降水-径流、水资源供-需、丰-枯及水资源不同时间序列状态的前-后等大量集对现象，利用水资源影响要素或水资源要素自身时序变化一分为三地构成集对组合，可构建多种水资源集对预测方法^[30]。降水预测对保障水利高质量发展具有重要作用，许美玲^[73]用集对分析计算三种不同预报模式与强降水的联系度，提出强降水过程预报集对分析方法；刘永等^[74]建立基于秩次集对分析的年降雨量预测模型，可克服分类标准确定主观性的不足。径流预测可为水资源管理提供有效支撑，王红芳等^[75]将不同时间序列滞后的径流构建集对、进行径流预测，精度较高；卢家海^[76]用联系数计算各单个预测模型的权重，建立了径流组合预测方法，精度明显高于单个模型。水资源直接预测方面，汪明武等^[77]耦合有序聚类、模糊集理论和集对分析方法，能够综合考虑城市需水量各影响因素之间以及与历史数据之间的确定和不确定关系；宋帆等^[78]建立了灰关联-集对聚类耦合用水量预测模型，预测精度优于 GM 模型和 BP 模型。可见，水资源集对分析预测中，主要结合水文循环的主要环节、水资源开发利用及水环境影响等单方面开展预测研究，方法主要有集对分析相似预测、秩次预测、聚类预测等方法，其中，集对分析相似预测目前最为常用。

4.3 水资源集对评价 集对分析模拟辩证思维，从同、异、反三方面全方位地对水资源系统进行多属性综合评价，主要应用于水质、水资源可持续利用及协调发展、水安全、水资源风险、水资源承载力等评价领域，水资源集对评价文献占到水资源集对分析研究相关文献的 70% 以上。水质评价引入水资源集对分析方法研究较早，俞俊英等^[79]研究提出了水质评价集对分析方法；李凡修等^[27]提出用分段函数计算单指标评价联系数，构建了集对分析单指标评价方法；王栋^[55]将集对分析和模糊集合论结合，构建水环境评价模型，以全面反映评价水样与评价标准间的模糊关系。水资源持续开发利用评价对促进区域水资源与社会经济协调发展具有重要意义，Zhou 等^[36]提出耦合联系数与距离协调模型的水资源系统协调发展评价方法，可有效解决评价结果的均质化问题；金菊良等^[24]提出相对联系数方法，可有效克服评价指标体系构建过程中的主观性问题。安全与风险评价是区域水资源可持续利用支撑经济社会高质量发展的基础，汪哲荪等^[80]将三角模糊数与联系数相结合，构建防洪工程联系数风险评估模型，增强了模型的可靠性和有效性；金菊良等^[81]用联系数将模糊风险矩阵合成的区域旱灾风险评估方法，比传统风险矩阵法更精细；Zhou 等^[82]提出基于联系数结构的信息扩散模型，消除传统模型中平均距离假设的约束，风险评估在样本量增大情况下效果更加稳定。水资源承载力评价是目前水资源集对评价较为集中的热点应用方向，金菊良等^[15]提出了减法集对势，模型原理清晰，计算方便，应用比较广泛；金菊良等^[42]在水资源承载力评价中提出效应全偏联系数，对比发现其计算更为合理；李征等^[17]提出基于半偏联系数和动态减法集对势的水资源承载力评价模型，为集对事件动态分析提供了途径。可见，集对系统中同异反一分为三的辩证思维引入水资源集对评价领域后，无论对集对分析评价的理论研究，还是结合水资源系统问题的应用方面均出现了大量综合评价方法，尤其是近年来，集对分析的伴随函数方法、集对分析与其他方法相耦合的新评价方法发展迅速。

4.4 水资源集对决策 在水资源决策中，运用集对分析方法从同异反三方面进行决策方案评价、选优，可实现合理开发、利用、保护和治理水资源方面决策方案的优选^[5,14,26]。郭旭宁等^[83]基于集对分析提出确定供水水库群联合调度规则的调度方法；唐言明等^[84]提出了广义联系度函数、并用于城市防洪标准方案优选模型；张礼兵等^[85]基于模糊集对分析法优化了灌区水库旱限水位和供水策略。目前的水资源集对决策研究主要有两类：一是直接应用集对分析方法对不同方案进行对比评价后优选；二是采用集对势、偏联系数等伴随函数方法或与水资源决策其他方法耦合，对水资源不同调控方案进行综合评价后实现决策选择，而基于机理的水资源集对决策模型研究仍然不足。

5 结论与展望

5.1 结论 (1)近 25 年来水资源集对分析方法发展历程可划分为三个阶段：1998—2004 年为水资源集对分析方法移植研究阶段，发展较为缓慢；2005—2017 年为水资源集对分析方法耦合研究阶段，偏联系数方法的提出及应用推动了水资源集对分析研究的较快发展；2018 年至今为水资源集对分析方法创新研究阶段，联系数伴随函数一系列新方法推动了水资源集对分析方法新一轮快速发展。水利、资源和环境等学科是目前水资源集对分析方法集中研究领域，水资源系统综合评价为当前研究热点主题。

(2)集对分析联系数同异反关系形式确定可以直接面向水资源变量，采用离散统计、水资源特征的变量分级、分段函数等方法从同、异、反三方面进行量化计算，还可进一步面向水资源变量间作用关系进行同异反辩证关系取值和等级划分，深化水资源集对分析辩证关系的研究。

(3)面向联系数取值及其应用的减法集对势快速发展成一个相对独立重要方向，并且与偏联系数、半偏联系数等其他伴随函数方法耦合形成了一系列水资源集对分析新方法。面向联系分量转化的偏联系数中全偏联系数计算值的含义、偏正与偏负联系数中差异不确定系数的内涵及其与二阶偏联系数的关系等关键问题目前仍未形成共识，高阶偏联系数的理论解析和定量计算研究都十分薄弱，发展相对缓慢；邻联系数的研究还相对较少，表达式仍存不同形式；联系熵中同熵、异熵、反熵在联系数反映同异反关系结构方面的物理内涵尚不统一，这些都有待结合水资源复杂系统不确定性继续深化理论和应用验证研究。

(4)水资源集对评价是当前水资源集对分析方法最热的应用领域；集对预测主要为水资源系统单要素预测，以相似预测为主；集对决策还主要是水资源优选方案的综合评价，定量化集对决策模型研究仍显不足。

5.2 展望 (1)采用理论与应用紧密结合的研究途径，强化集对分析方法与水资源实际问题应用的适用性研究，形成理论与应用戴明循环迭代式水资源集对分析闭环研究，主要包括：结合水资源系统问题物理成因解析，探索基于水资源问题物理过程的同异反划分标准临界阈值的优化方法研究；结合水资源集对应用目标和水资源系统时空变化特性中同异反临界阈值设定对目标的影响开展差异度系数优化与动态取值研究；深入分析水资源复杂系统中不同对立关系^[29,86]，创新适用不同对立关系类型的水资源集对分析方法研究。

(2)采用物理解析与定量计算相结合的研究途径，深入开展基于计算思维的水资源集对分析伴随函数研究。将物理内涵解析与定量计算相结合，理清高阶偏联系数等联系数伴随函数基本物理内涵，推进高阶偏联系数、邻联系数、联系熵等伴随函数形成物理内涵清晰、统一的定量计算表达式。结合实际水资源实际问题开展联系数伴随函数验证研究。

(3)采用多种方法相耦合的研究途径，深入研究并构建多样化的伴随函数耦合模型，探索构建与水资源实际问题分析方法融合的联系数伴随函数组合模型，揭示水资源集对系统联系数中同异反关系的辩证演化特征，不断推进水资源集对分析理论方法研究，以更深入理解水资源系统的复杂性。

(4)深化评价对象、评价指标、评价目标三者之间内在关系的分析，推进物理解析与定量计算相结合定量化评价指标体系集对筛选方法研究；构建融合水资源形成过程物理机制的集对预测模型，从单一因子预测研究逐步转向复杂的水资源系统预测和预警研究；开展基于集对分析与水资源复杂系统具体问题仿真模拟相结合的水资源集对决策研究，拓展水资源集对动态决策与调控应用研究。

(5)借鉴其他学科集对推理研究成果^[87-89]，辩证统一地开展水资源集对逻辑、集对推理等方面的开拓研究，构建水资源集对推理模型，推动不同联系数交互运算这一关键方向发展，为水资源子系统间交互作用和协调发展研究提供科技支撑。

参 考 文 献：

[1] CUI Y, ZHOU Y L, JIN J L, et al. Coordinated development evaluation and diagnosis of regional water resources—

- p>social economy-ecological environment system based on mechanical model and risk matrix[J]. Journal of Hydrology, 2024, 633: 131013.
- [2] GUO L D, WU Y T, HUANG F, et al. An approach to complex transboundary water management in Central Asia: Evolutionary cooperation in transboundary basins under the water-energy-food-ecosystem nexus[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 19940.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 赵克勤. 集对论化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.
- [6] 庞朴. 中庸与三分[J]. 文史哲, 2000(4): 21-27.
- [7] 周德义. 恩格斯“一分为三”的辩证思维方式—《自然辩证法》释读[J]. 湖湘论坛, 2002(4): 89-91.
- [8] 赵克勤. 集对与集对分析—一个新的概念和一种新的系统分析方法[C]//全国系统理论与区域规划研讨会论文集. 1989.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法—集对评价法[J]. 中国科学(技术科学), 2009, 39(9): 1529-1534.
- [12] 符秋菊, 郭纯青, 周蕊, 等. 集对分析在水文统计分类及相似性分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 47-50.
- [13] CUI Y, ZHOU Y L, JIN J L, et al. Quantitative evaluation and diagnosis of water resources carrying capacity (WRCC) based on dynamic difference degree coefficient in the Yellow River Irrigation District[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 816055.
- [14] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 等. 基于偏联系数的三支决策模型及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(6): 1346-1356.
- [15] 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.
- [16] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 507-520.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ZHOU R X, JIN J L, CUI Y, et. al. Spatial equilibrium evaluation of regional water resources carrying capacity based on dynamic weight method and Dagum Gini coefficient[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 790349.
- [20] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水电工程学报, 2021(1): 36-44.
- [21] 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, 92.
- [22] LIU J, CHEN J, YUAN Z, et al. Water resource security evaluation of the Yangtze River Economic Belt[J]. Water Supply, 2020, 20(4): 1554-1566.
- [23] 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, 78.
- [24] 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.
- [25] 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.

- [26] 龚士良. 上海地下水资源管理集对分析[J]. 地下水, 1998(1): 9-11.
- [27] 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, 16.
- [28] 赵克勤. 偏联系数[C]//中国人工智能进展. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [29] 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.
- [30] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [31] 王文圣, 向红莲, 李跃清, 等. 基于集对分析的年径流丰枯分类新方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008(5): 1-6.
- [32] 金菊良, 孔令茹, 崔毅, 等. 基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 340-348.
- [33] 李德顺. 基于广义集对分析的系统危险性评价研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [34] CUI Y, FENG P, JIN J L, LIU L. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5): 359.
- [35] ZHOU R X, JIN J L, CUI Y, et al. Agricultural drought vulnerability assessment and diagnosis based on entropy fuzzy pattern recognition and subtraction set pair potential[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 51-63.
- [36] ZHOU R X, JIN J L, WU C G, et al. Connection number-based model for coordination development evaluation of regional water resources, social economy and ecological environment complex system[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 339: 117913.
- [37] 金菊良, 刘鑫, 周戎星, 等. 引力减法集对势方法在旱灾风险动态分析评价中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(12): 7-11, 28.
- [38] 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]. 水利水电工程学报, 2024(3): 62-71.
- [39] 杨红梅. 偏联系数的哲学原理与应用[M]. 北京: 国家开放大学出版社, 2020.
- [40] 覃杰, 赵克勤. 基于偏联系数的医院医疗质量发展趋势综合分析[J]. 中国医院统计, 2007(2): 127-129, 132.
- [41] 陆广地, 吴宝明, 赵克勤. 用偏联系数与态势函数对高校评价的聚类分析[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(19): 50-59.
- [42] 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.
- [43] 杨红梅, 赵克勤. 偏联系数的计算与应用研究[J]. 智能系统学报, 2019, 14(5): 865-876.
- [44] 金菊良, 沈时兴, 潘争伟, 等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 54-66.
- [45] 何飘. 基于联系数的区域水资源承载力动态分析评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [46] LI Z, JIN J L, CUI Y, et al. Dynamic evaluation of regional water resources carrying capacity based on set pair analysis and partial connection number[J]. Water Supply, 2022, 22(3): 2407-2423.
- [47] 陈浩, 金菊良, 崔毅, 等. 基于半偏联系数和动态差异度系数的区域旱灾风险评估方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 25-35.
- [48] 哈丽阳, 杨晓燕, 卜让吉. 基于联系数伴随函数的医疗质量发展趋势分析[J]. 中国卫生统计, 2011, 28(1): 68-69, 71.
- [49] 刘秀梅, 赵克勤. 区间数决策集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [50] 孙爱峰, 孙齐蕊. 基于联系数伴随函数的公共场所卫生质量态势和趋势分析[J]. 中国卫生产业, 2015, 12(25): 24-26.
- [51] 李琪琪. 北衙金矿露天采场风险辨识评估体系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [52] 金菊良, 张浩宇, 崔毅, 等. 联系数伴随函数的若干问题探讨[J]. 黑龙江大学工程学报, 2020, 11(2): 1-10.
- [53] 金菊良, 何飘, 张浩宇, 等. 减法全邻联系数及其在区域水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 438-446.

- [54] 赵克勤. 集对分析与熵的研究[J]. 浙江大学学报(社会科学版), 1992(2): 68-75.
- [55] 王栋. 熵及其在水系统中的研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [56] 金菊良, 刘鑫, 周戎星, 等. 联系熵方法在水资源承载力评价中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 447-455.
- [57] 李晨. 基于水质水量的浅层地下水演化及优化调控研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [58] 朱其秀. 关于联系数的同异反态势熵及应用[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学版), 2000(6): 87-89.
- [59] 韦琦, 金鸿章, 郭健. 基于脆性联系熵的复杂系统崩溃致因研究[J]. 自动化技术与应用, 2003(4): 1-4.
- [60] 李言, 李丽红, 李爽, 等. 基于集对联系熵的三支决策模型及应用[J]. 郑州大学学报(理学版), 2017, 49(3): 52-58.
- [61] 吴成国, 王晓宇, 金菊良, 等. 基于有序联系度熵的水资源空间均衡综合评价方法[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1304-1316.
- [62] 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, 34.
- [63] 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, 186.
- [64] 袁康, 周戎星, 崔毅, 等. 两次半偏减法集对势方法评价水资源承载力[J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 93-100.
- [65] 汪洁, 金菊良, 周戎星, 等. 基于连续半偏减法集对势的区域旱灾风险评估方法[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 229-234.
- [66] 金菊良, 周乐, 崔毅, 等. 基于连续演化半偏减法集对势的区域旱灾风险评估方法[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 45-51.
- [67] 朱兵, 王红芳, 王文圣, 等. 基于集对原理的峰和量关系分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(3): 29-33.
- [68] 王文圣, 李跃清, 金菊良. 基于集对原理的水文相关分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(2): 1-5.
- [69] 郑威, 于国荣, 张代青. 径流丰枯分类的投影寻踪-集对分析耦合方法[J]. 水文, 2020, 40(2): 17-22.
- [70] 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.
- [71] 徐泗鑫, 李蔓, 金菊良, 等. 减法集对势在佛子岭水库汛期时间域划分中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 935-943.
- [72] 邓红霞, 李存军, 张少文, 等. 基于集对分析的相似流域选择方法[J]. 人民黄河, 2006(7): 3-4, 20.
- [73] 许美玲. 集对分析在云南强降雨预报集成方法中的应用[J]. 气象, 2004(6): 39-42.
- [74] 刘永, 马飞, 董小花, 等. 基于集对分析的德州市雨洪资源潜力研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 310-313.
- [75] 王红芳, 黄伟军, 王文圣, 等. 集对分析法在长江寸滩站年径流预测中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2006(4): 3-5.
- [76] 卢家海. 基于集对分析的径流组合预测模型[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(11): 1-4.
- [77] 汪明武, 蒋辉, 张立彪, 等. 基于联系隶属度的城市需水量预测模型[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 12-15, 24.
- [78] 宋帆, 杨晓华, 武翡翠, 等. 灰色关联-集对聚类预测模型在吉林省用水量预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 28-33.
- [79] 俞俊英, 龚士良. 基于集对分析的地下水水质评价[J]. 地下水, 1999(2): 54-55, 87.
- [80] 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.
- [81] 金菊良, 张诗懿, 崔毅, 等. 基于模糊风险矩阵和联系数的区域旱灾风险评估[J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 35-44.
- [82] ZHOU L G, JIN J L, CUI Y, et al. Connection number structure-based information diffusion model for agricultural drought disaster risk assessment: A case study in Jianghuai watershed area[J]. Ecological Indicators, 2023,

154; 110710.

- [83] 郭旭宁, 胡铁松, 张涛, 等. 基于集对分析的供水水库群联合调度规则[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1510–1516.
- [84] 唐言明, 白夏, 卜松, 等. 基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 178–181, 201.
- [85] 张礼兵, 白亚超, 金菊良, 等. 基于模糊集对分析的灌区水库旱限水位及供水策略优化研究[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1154–1167.
- [86] ZHOU L G, JIN J L, ZHOU R X, et al. Advances in adjoint functions of connection number in water resources complex systems: a systematic review[J]. Entropy, 2024, 26(4): 339.
- [87] 蒋云良. 基于集对分析的同异反定量推理路径的选择[J]. 湖州师专学报, 1999, 21(5): 51–54.
- [88] 杨亚峰. 基于集对逻辑的近似推理方法研究[J]. 智能系统学报, 2015, 10(6): 921–926.
- [89] 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.

Research progress on the theory and application of water resources set pair analysis methods

JIN Juliang¹, ZHOU Lianguang^{1,2}, CUI Yi¹, WU Chengguo¹, ZHOU Rongxing³, ZHANG Libing¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

3. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The application of the same, different, and opposite dialectical thinking in the set pair analysis method has unique advantages in dealing with the uncertainty problems of complex water resource systems, which has become an important frontier and research hotspot in the study of quantitative calculation and physical analysis of water resource uncertainty. In response to the problems of unclear physical analysis and inconsistent calculation formulas in some set pair analysis methods, combined with bibliometric analysis, this paper systematically summarizes the theoretical and applied research progress of water resources set pair analysis methods in the past 25 years. The results show that: (1) the set pair analysis of water resources has undergone three development stages of transplantation, coupling, innovation. The development during the transplantation period was relatively slow, while new adjoint function methods such as coupling coefficient and subtraction set pair potential in the coupling and innovation period promoted the continuous and rapid development of water resources set pair analysis methods. (2) The fields of water conservancy science, resource science, and environmental science are the subject areas of the current water resources set pair analysis method. The comprehensive evaluation of water resources issues is the main research hotspot. (3) The subtractive set pair potential proposed based on the water resources system evaluation has rapidly developed into a relatively independent important direction, and a series of new subtractive set pair potential methods combined with partial connection number, semi-partial connection number and other methods for analyzing complex water resources systems have emerged. However, there is still no consensus on the series of issues such as the calculation of higher-order partial connection numbers and the physical connotation of connection entropy, and the study of neighborhood connection numbers is still relatively scarce. (4) At present, set pair evaluation of water resources is the hottest application field of current research. The set pair prediction of water resources is also basically a single-factor prediction, with similar prediction methods in the majority. The set pair decision-making still belongs to the category of evaluation, and the research on the quantitative decision-making and reasoning models is still insufficient. Therefore, this paper looks forward to the development trend of water resources set pair analysis methods such as water resource set pair reasoning, in order to provide dialectical thinking and theoretical methods for the uncertainty analysis of complex water resources systems, development of structural water resources science and so on.

Keywords: water resources set pair analysis method; set pair system; same, different and opposite relationships; one dividing into three; dialectical relationship; set pair potential; partial connection number; semi-partial connection number

(责任编辑: 耿庆斋)