

中 文 摘 要

汾河流域是山西省最大的产粮区，水土资源丰富，但不合理的种植规划和低下的水资源利用效率，未充分发挥土地的生产潜力。当前的能源和粮食生产不仅忽视了水-能源-粮食的协同促进作用，更忽视了各部门的合作。因此，为实现汾河流域各部门的共赢，探索区域绿色发展，建立了引入信息间隙决策理论（IGDT）和区间非线性规划的水-能-粮-碳（WEFC）优化模型，对水土资源优化配置进行研究，结果为汾河流域可持续资源管理提供了详细的水土资源优化方案，主要研究内容和结论如下：

（1）建立水土资源优化配置模型，分别求解了不同水文年各部门水资源分配方案和小麦、玉米的种植结构优化方案。优化结果更注重规避高风险，各部门配水的优先级为水电部门>工业>生活>生态，配水量均能满足其最小用水需求。中游玉米面积占总种植面积的比例高达 82.38%，枯水年中游小麦的种植面积减少了 2.08%，下游小麦种植面积减少了 26.25%。水力发电量稳定在 1.00×10^8 kWh，可节省 1.23×10^4 吨标准煤。生物质能源产热值的范围为 3.84×10^{13} kJ 至 4.63×10^{13} kJ。

（2）采用 IGDT 风险回避理论计算了不同预期收益下的水资源分配方案，结果表明，随着预期收益的减少，WEFC 系统的水资源会更多地分配给经济效益较好的环境和工业部门，即损失由成本较高收益较低的部门承担。IGDT 理论能灵活处理系统的不确定性，增加了系统水资源分配策略的鲁棒性。

（3）为优化分配作物各生育阶段供水，构建了一个多目标农业水资源优化配置模型，旨在实现灌区净利润最大化和灌溉水损耗最少。研究结果表明，从平水年过渡到偏旱年时，经济指标显著降低，数值下限从 6.76×10^8 元（P=50%）降至 5.03×10^8 元（P=75%），上限从 7.79×10^8 元（P=50%）下调至 6.56×10^8 元（P=75%）。该模型的建立为汾河其他灌区在整个生育期内实现最优用水配置提供了理论支持。

关键词：汾河流域；碳足迹；IGDT；水-能-粮-碳纽带关系；优化模型

ABSTRACT

The Fenhe River Basin is the largest grain-producing area in Shanxi province, with abundant water, soil, and land resources. However, irrational planting planning and low production efficiency of water resources have not fully tapped the production potential of this land. The current energy and food production not only ignores the synergistic promotion of water-energy-food, but also ignores the collaborative cooperation of various departments. Therefore, in order to achieve win-win cooperation among various departments in the Fenhe River Basin and explore regional green development, we have established the WEFC optimization model that introduces IGDT theory and interval nonlinear programming to optimize the rational allocation of water and soil resources. This research not only provides optimized water and soil allocation schemes for various departments in the Fenhe River Basin for sustainable resource management, but also optimizes the water allocation for typical crops at various growth stages. The main research content and conclusions are as follows:

(1) We established a water and soil resource optimization allocation model and solved the departmental water resource allocation and wheat and corn planting structure optimization allocation schemes for different hydrological years. The optimization results focus more on avoiding high risks, and the water allocation of each department meets its minimum water demand. In terms of planting structure optimization, the proportion of midstream corn area to the total planting area is as high as 82.38%, and the planting area of midstream wheat decreased by 2.08% in dry years, and the planting area of downstream wheat decreased by 26.25%. The hydropower generation is stable at 1.00×10^8 kWh, which can save 1.23×10^4 tons of standard coal. The range of biomass energy production heat value is from 3.84×10^{13} kJ to 4.63×10^{13} kJ.

(2) We used IGDT risk aversion theory to calculate the water resource allocation scheme under different expected returns. The results show that with the decrease of expected returns, the water resources of the WEFC system will be

more allocated to the environmental and industrial sectors with better economic benefits, and the losses will be borne by the departments with higher costs and lower returns. IGDT theory can flexibly handle the uncertainty of the system and increase the robustness of the water resource allocation strategy.

(3) A multi-objective agricultural water resources optimization allocation model was constructed to optimize the allocation of water supply to each fertility stage of crops, aiming to maximize net profit and minimize irrigation water loss in irrigation districts. The results of the study showed that the economic indicators were significantly reduced when transitioning from a flat water year to a partial drought year, with the lower limit of the value decreasing from 6.76×10^8 yuan (P=50%) to 5.03×10^8 yuan (P=75%) and the upper limit decreasing from 7.79×10^8 yuan (P=50%) to 6.56×10^8 yuan (P=75%). The establishment of this model provides theoretical support for achieving optimal water allocation in other irrigation districts of the Fenhe River throughout the fertility period.

Key words: Fenhe River Basin; Carbon footprint; IGDT; WEFC nexus; Optimization model

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 WEF 两个子系统关联研究	3
1.2.2 WEF 系统优化研究	6
1.2.3 不确定性研究方法及应用	7
1.3 研究目标及内容	8
1.4 技术路线图	9
1.5 研究区域概况	10
第二章 基于水能粮系统安全的水土资源优化配置	13
2.1 模型建立	13
2.1.1 目标函数	13
2.1.2 约束条件	15
2.2 资料数据	17
2.3 模型结果分析	20
2.4 本章小结	29
第三章 基于信息间隙决策理论的水资源优化分配策略	31
3.1 信息间隙决策理论	31
3.2 模型建立	33
3.3 模型结果分析	34
3.4 本章小结	40
第四章 不确定条件下作物全生育期水量分配	41
4.1 区间多目标规划模型	41
4.1.1 多目标规划模型	41
4.1.2 区间规划模型	41
4.1.3 改进后的区间多目标优化模型	43
4.2 模型建立	44
4.3 资料数据	47
4.4 模型结果分析	48

4.5 本章小结.....	56
第五章 结论与展望.....	57
5.1 结论.....	57
5.2 主要创新点.....	58
5.3 展望.....	58
参考文献.....	59
致 谢.....	67
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	69

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

水安全、粮食安全和能源安全是人类可持续发展的基础保障，是维护国家安全，促进经济发展实现我国战略目标的重要命脉。近年来随着人口激增和经济发展导致资源的过度开发与不合理利用，进而造成水、能源、粮食资源短缺，阻碍了全球尤其是我国这个人口大国的向前发展。水、能源、粮食都是满足经济可持续发展的战略资源，三者之间的联系更是密切，对其内部复杂关系和相互作用的深入研究是资源协调与安全的重要课题，是实现区域性关键资源可持续绿色发展的必然趋势。

当前我国水资源的安全问题主要体现在洪涝干旱等自然灾害导致的生态退化、供水短缺和用水浪费导致的水资源供需失衡、产业结构和布局不合理导致的水资源时空分配不均衡以及管理体制实践和创新不足导致的水资源污染上。由于重工业和轻工业的发展，排入河流中的污染物种类繁多，大量的水资源污染，加剧了水资源的紧缺程度，导致水资源供需的动态失衡。而水资源短缺，会导致工农业争水，尤其是对农业的影响，会导致灌溉耕地的粮食作物大量减产，危及粮食安全。据预测，2030 年人均粮食需求更是达到了 450 kg^[1]。我国人均粮食占有量已高于世界平均水平，但粮食安全仍是永恒课题。气候环境和人为活动对农业的影响，使粮食安全时刻不能松懈。我们需要打牢粮食安全的基础，提升供给保障能力，掌握粮食安全的主动权。除了水安全和粮食安全受到严重威胁外，当前能源形势也不容乐观。国际能源署（IEA）表示，随着欧洲液化天然气（LNG）供需失衡，对煤炭的需求量大幅增加，但受全球局势、疫情、恶劣自然条件和碳减排的影响，煤炭开采量大大减少，世界进入了“第一次真正的全球能源危机”。根据国际能源署（IEA）2016 年报告指出全球能源需求预计增长 25%，尽管电气化发展迅猛，但未来仍有 10 亿人可能用不上电。而我国作为全球最大的能源消费国，虽然拥有 2.08×10^{11} 吨的煤炭储备^[2]，占全球已探明储量的 11%，但是人均拥有的煤炭只有全球平均水平的 42.5%，而且大部分都是依靠进口。我国的能源安全问题不仅仅是总量问题，还涉及到能源生产技术的滞后，对环境和生态造成了严重的负面影响。我国的能源安全问题十分严峻，主要表现在能源供应不稳定、能源消耗过度、能源结构不合理等方面。同时，新能源、清洁能源的发展速度较慢，也是制约我国能源安全的重要因素。为了解决这些问题，我们需要探讨并实施一系列有效的措施，包括加强能源供应保障、推进能源结构调整、加快新能源、清洁能源的发展等实现我国

能源安全的可持续发展。

水安全、粮食安全和能源安全本质上是相互交织的。水土资源是粮食生产的基础条件，水除了用于农业灌溉外还用于发电和冷却火力发电^[3, 4]，尤其在当前绿色可持续发展的背景下，清洁能源代替一次能源将会是未来必然的发展趋势，而水电更是可再生清洁能源的主力军。不仅如此，能源不仅在现代灌溉技术中对抽取地下水至关重要，对城市水循环系统的关键性也不容忽视。水和粮食的紧密联系在农业对水和灌溉的需求中表现得最为明显。据中国水资源公报显示，2020 年全国用水总量 $5.81 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，总耗水量 $3.14 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，耗水率高达 54.0%，同比增加 0.8%。而农业作为用水最多的部门，耗水量更是达到了总耗水量的 74.9%，但是农业用水的平均利用系数仅有 0.45^[1]。除此之外，能源和粮食之间的协同性也同样显著，例如粮食生产加工过程中农业机械的参与以及在粮食生产过程中，灌溉提水输水过程中能源输入。此外，作物生产产生的生物质能源秸秆更是满足碳中和背景下可开发利用的重要清洁能源。而目前，包括农作物秸秆和薪柴在内的传统生物能源仍在农村居民能源消费中占主导地位，并在 2012 年占总能耗的 60%^[5]。这表明，生物质资源具有巨大的能源发展潜力，而且生物质资源可持续供给，可减少化石燃料的消耗，从而降低碳排放。因此，为了满足区域可持续的水供应及粮食能源安全，实现稳定的经济增长，对水能粮纽带（WEF）关系的研究有助于实现可持续管理，寻求更加绿色的发展途径及更先进的 WEF 纽带系统，保障国家资源的战略安全。

山西省矿产资源丰富，是我国重要的产煤基地，近十年累计产煤量占全国产量的四分之一，供应全国多省用煤，是国家能源安全的坚实后盾，在未来很长时期内的战略地位不会改变。但随着生态优先的发展理念深入人心，能源生产方式的转型是山西省紧跟时代发展迫在眉睫的任务。此外，碳达峰、碳中和理念的提出以及环境保护绿色发展的要求，开发新的清洁能源刻不容缓。汾河流域是山西省最大的产粮区，气候半湿润，但水资源却十分短缺，且时空分布不均。据统计，该地区人均水资源仅为 378 立方米，仅占全国平均水平的 18%。土地资源丰富，但不合理的种植规划，未充分发挥这片土地的生产潜力。水资源生产效率低，例如不合理灌溉导致的水资源浪费，以及当前的能源和粮食生产不仅忽视了水-能源-粮食的协同促进作用，更忽视了各部门的协同合作。部门水能竞争更是将区域发展的短板显露无疑：在发展社会经济的工业部门、满足环境可持续的生态部门以及满足粮食安全的农业生产部门之间存在严重用水冲突，目前同时满足各部门的用水需求很难实现。此外，80%以上的河段未达到国家

水质标准，水短缺和水污染都加剧了流域水资源供需失衡和跨部门水资源竞争。随着新时代的发展要求对生态环境高标准的提出，必须探索解决汾河流域严重环境问题和缺水问题的有效途径，这意味着解决各部门水资源配置的平衡协调、提高水效率、减少污染物的问题至关重要，区域各部门协同合作，水-能源-粮食（WEF）关联性的探索和应用对经济可持续发展影响深远。

因此，从 WEF 纽带系统的角度研究，结合各部门的用水需求，实现汾河流域生态、能源、农业发展的共赢，探索区域绿色发展，综合考量系统的不确定影响因素及解决理论，对水土资源进行合理优化配置的研究，对汾河流域的可持续发展具有跨越式的意义。

1.2 国内外研究现状

自波恩会议提出 WEF 纽带概念以来，Al-Saidi 和 Elagib^[6]阐明了其关系思维出现背后的驱动因素，并强调了水、粮食和能源之间问题的“整合”和“交联”的必要性。WEF 纽带认识到水、能源和粮食部门之间复杂的相互关系，是解决与水、食物和能源相关的各种问题的有效工具，为实现水、能源和粮食安全提供了一种途径，有助于确保满足人类基本需求，为探索跨部门、跨规模的综合管理和治理的新方法奠定了基础^[7]。

1.2.1 WEF 两个子系统关联研究

（1）水资源系统与粮食系统的关联性研究

为了实现水资源可持续利用，同时满足粮食需求，目前国内外对于水土资源优化配置^[8-10]的研究相对丰富，并具有较强的现实意义。最初的研究大多针对水资源的优化配置，这是解决水污染、水资源短缺和水供需矛盾上升的最有效解决方案之一。以种植结构^[11]或用水结构^[12]为优化目的单目标和多目标模型的相关研究较为成熟并已广泛地应用于各地区的农业发展规划中，例如灌区水资源优化配置序列模型和灌区内部不同用水户与渠系水资源的优化分配模型，均以生态和节水为导向，旨在实现水资源的最优利用，同时保护生态环境^[13]。此外，初步对区域水安全评价以及评价指标体系的建立、对粮食作物与水关联的时空分布特征和水资源利用效率提升以及区域粮食生产需水预测出发的分析都是当前的研究热点。

随着时代发展的要求，在农业水土资源优化配置研究中应用各种不确定性方法也已相对成熟，例如针对水资源分配和水质管理的不确定性，开发了不精确两阶段随机规划（ITSP）模型集成了区间参数规划（IPP）和两阶段随机编程（TSP），并解决了表示为概率分布和离散区间的不确定性^[14]。在 GONG 等^[15]的模型框架下，构建基于时间

序列的可持续降雨及不确定因素的区间规划模型，获取具有典型特征的具有地表水及地下水量特征的灌区种植布局优化方案。此外，还存在一种以排队理论为基础，对灌溉地下水水量时变不确定性进行分析的方法^[16]，以及考虑决策者的主观意愿，如改变发展优先顺序、追求最大的经济效益或平衡发展、加强环境保护这些不确定性因素下的最优策略。李茱等^[17]将大气水-地表水-土壤水-地下水的水循环过程纳入到模型中，利用有限的水资源进行精确的灌溉。结果表明，在不同的地下水位、土壤水分条件下，采用土壤水平衡模式与 Jensen 模型联合，可以得到最优的水资源分配方案；在此基础上，将碳足迹模型、土壤水量平衡模型以及地下水动力学模型有机地融合在一起，可降低土壤碳排放，提升水资源的使用效率，并可动态地反应多形态水的转换过程^[18-20]。在此基础上建立基于不确定性的流域水-粮耦合优化模型，将更加全面地描述流域水-粮耦合关系，提高模型预测精度，促进流域水-粮耦合关系的协调发展。

（2）水资源系统与能源系统的关联性研究

为了维护全球可持续发展，人们广泛讨论了水资源系统和能源系统耦合生产的重要性^[21]。在热电生产过程中，化石燃料始终占据着主导地位，大量的水资源被用于冷却。同时在各部门间分配水资源过程中，泵送、运输、处理都需要消耗大量的能源^[22, 23]。2014 年，水资源部门消耗了全球约 4% 的电力和 5000 万吨油当量的热能，而能源部门的运营需要全球抽取 10% 的水。水资源和能源的可用性、社会对能源和水的需求、环境影响等都影响着能源和水关系的未来。可用水源的位置和水量以及期望的水质输出都有可能影响甚至决定能源处理方案，并且都受用水政策和政府相关法规的制约。随着电力行业和其它部门的水分配冲突加剧，在能源密集和缺水地区采用综合方法来研究能源和水之间不可分割的关系十分必要。水资源-能源关联性研究主要解决发电燃料供应及水供应、温室气体排放产生的环境影响等^[24]，多数学者从水-能关系宏观评估的方法出发，开发了一系列新的方法和框架来评估水-能间的相互作用^[25]并从更广泛的空间层面^[26, 27]和时间层面出发对水-能关系进行分析^[28, 29]，Shang 等^[30]测量了煤炭能源生命周期对水资源的需求，分析了煤炭生产到消费过程中对水资源的破坏性影响。在相关文献中有效评估能-水系统相互联系的能力已经较为成熟，在水-能关系定量出发的角度为切实解决系统矛盾的方法也开始兴起^[25]。Larsen 等^[31]通过每单位燃料生产的用水量的估计指标来分析能-水关系。Basheer 等^[32]通过引入水-能生产率这一概念来说明水损失和能量生产之间的紧密联系。Chen 等^[33]通过一个可持续能源发展模型，以预测中国西部的能源和水消耗。学者们也对更复杂的能-水系统协调进行相关研究，例如

Zhang 等^[24]为了协调能-水关系中两级利益相关决策者不同目标和偏好, 通过一个双层决策模型并用交互式模糊优化算法调整其容忍度帮助决策者更好的了解和权衡能-水关系。而 Huang 等^[34]通过进一步将水资源系统集成到能源系统模型中, 评估了碳和水限制对中国发电的影响。也有学者从生产成本出发, 开发了经济调度方法, 从供应侧协调能-水系统的电力和水^[35]。Lubega 和 Farid^[36]从工程系统的角度开发了一个模型, 优化能源和水系统内部发电、工程供水和废水管理。

有研究表明, 我国未来煤炭转化和利用需要的水量将超过可供水量, 很大程度上限制了我国煤炭资源的开采^[37]。为改变我国以煤炭为基础能源对环境造成大规模破坏的现状, 保障未来经济发展以及恢复生态, 推广煤炭生产过程节水技术的应用远不能解决当前困境, 对水-能系统进行多维度分析, 各部门有效协调水资源管理和使用, 开发清洁能源是势在必行。

(3) 能源系统与粮食系统的关联性研究

相对于水-能系统和水-粮系统的关联性研究探索, 能源和粮食的关联性研究较少, 主要集中在粮食生产过程中能源的投入、能源系统和粮食系统价格关联性以及可从中提取的生物质能源产生的经济效益。徐建辉等^[38]研究者以能值核算方法为基础, 从能量的角度, 对我国主要粮食作物的生产、加工全流程的全要素生产率进行了测算。并运用数据分析法, 对比了 2004-2008 年我国主要粮食作物的能效变化, 这样的研究思路可以更好地揭示系统要素对能效变化的作用机理。尹靖华^[39]分析国际能源价格和国内粮食价格的波动趋势, 并用 VAR 模型进行了实例验证分析能源价格对粮食价格的影响机理。还有学者研究了粮食作物受能源政策的影响。在这方面, 从能源角度出发研究粮食的生产效率是目前的热点, 董莹等^[40]利用随机模型以能值核算的角度来检验粮食体系的能效, 并将其与主要能源成分结合起来, 在此基础上研究了我国农业系统的能量利用效率及其变化规律, 研究成果为理解粮食能源体系的协同安全和实现可持续发展奠定理论基础。生物质燃料是一种具有很大发展潜力的环保型能源, 虽然由于其过程复杂性, 目前还不能完全替代化石燃料。但是, 其清洁性使其成为改善环境状况的重要选择。Wianwiwat 等^[41]对泰国生物能源发展与能源安全问题进行探讨, 而向涛等^[42]则利用随机效应模型研究了生物质燃料替代化石燃料的影响因素。这些研究有助于深入了解生物质燃料的发展趋势和其在能源领域的应用前景。生物质燃料虽然清洁高效, 但对农业系统依赖较大, 部门产出、土地分配、食品价格和政策策略的影响以及生产转化过程中的碳排放这些因素都是生物质能源是否能大规模发展的挑战。而 João Malca

和 Fausto Freire^[43]采用生命周期法证明生物质燃料具有正的能量平衡——即生成燃料中含有比生产过程中使用的更多的能量。

1.2.2 WEF 系统优化研究

随着水、能源、粮食各系统内部压力不断增加，三个系统彼此的联系越来越紧密，有必要更好地量化和了解与三个系统未来规划和管理有关的权衡和统一，这样有助于规划各部门相关利益以实现水资源安全、能源安全和粮食安全。此外，探索水、能源和粮食部门之间复杂的相互关系，可以为采取跨部门、最终跨规模的综合管理和治理新办法奠定了基础。

组带的概念是关于通过避免浪费和损失来确保资源的可持续利用^[44]，WEF 组带的探索，最早由外国学者 Bazilian 提出，他阐明了 WEF 的复杂关系，并提出了一个模型框架来研究。学者们针对 WEF 生成机制^[45]、系统安全分析、或者通过系统协调度^[46]和评价指标体系^[47]对系统进行评价以及 WEF 组带系统影响分析^[48]等进行深入探索。此外，部分研究基于投入产出模型^[49, 50]或系统动力学模型^[51, 52]对 WEF 框架进行模拟研究，并应用于各区域^[53, 54]，证明了 WEF 组带系统模型的适用性。然而，气候变化、环境压力、土地利用、人口增长及经济发展都对 WEF 组带有一定的影响。因此，学者们在 WEF 组带模型基础上开发了依赖能源-食物-水-土地关系（EFWLN）的可持续生物能源生产的优化模型^[55]、水-能-食物-环境关系模型（WEFEN）^[56]、水-食物-能源-气候变化-土地（WORLD）的非精确优化模型^[57]以及采用系统分析方法构建的“水-能源-粮食-经济社会”PSR 模型等^[58]对 WEF 系统进行全面扩展探索及分析。Ahmed M 等^[59]介绍了一个整体框架，该框架确定了能源与水、土地、环境和金融之间的联系，并应用了基于情景的能源组合评估工具（EPAT），为能源规划中的最佳可持续决策提供了坚实的基础，创建和评估基于水-能源-粮食（WEF）关联方法的各种情景的可持续性。此外，由于碳排放与 WEF 系统的紧密联系，考虑系统内碳足迹的水-能-粮-碳（WEFC）优化模型^[60, 61]也成为当前的研究热点，在我国提出 2030 碳达峰、2060 碳中和的发展目标下，能源利用方式和粮食生产转型、发展清洁能源以及节约用水等需求将大幅提升。因此，考虑碳排放的 WEF 组带系统规划变得刻不容缓^[62]。将碳足迹模型、土壤水平衡模型和地下水动力学模型相结合，实现土壤碳减排、水资源利用效率提高，多形态水转化等。这种方法有助于实现可持续发展目标，我们应该给予足够的重视，并对其进行深入的探讨。

利用新的治理模式和模型方法，可以提供明确的理论和政策指导，使各部门的财

政、经济、社会和环境效益最大化。加速研究创新，实现人人享有能源-水-粮食安全，在不牺牲发展目标的前提下提高投入资源的有效性，最大限度减少整个水-能源-粮食系统供应链以及从生产到消费的损失，提高水、能源和粮食资源的生产力，加大对可再生能源和绿色能源的重视，避免和回收废物。这些措施在创造新的资源的同时，也不会损害现有资源的可用性。

1.2.3 不确定性研究方法及应用

为了较全面地处理多个矛盾目标问题，满足决策者的多种决策需求，多目标规划方法已经被普遍采用，且已经具有多种成熟的求解方法。在水资源-粮食联结系统中，自然环境、社会经济和决策者的认知局限等因素都会导致模型的高度不确定性。为解决该问题，可以将模糊概念^[63]引入到多目标线性规划中，构建以优劣测度法为基础的模糊多目标线性分式规划算法^[64]，或者利用交互式模糊多目标优化算法^[65]等方法，这些方法能够有效地解决粮食系统种植结构的不确定性问题。

另外，在最优的灌溉条件下，由于大气降水、地表水、地下水等水资源的相互转换，其水资源的转换关系也具有较大的不确定性。在此基础上，构建包含有效降雨及不确定因素的区间规划模型^[66]，从而获得考虑地下水位及地表水容量的具有代表性的典型水文年份的灌区种植结构。利用排队论的思想，可以对地表-地下水耦合灌溉中的不确定因素进行分析，为地表-地下水耦合灌溉的不确定因素提供最优解^[8]。为了获得更好的灌溉效果，需要在作物的各个生长阶段，对水资源进行最优分配。例如针对漳河灌区稻田来水存在的不确定因素，提出的一种基于多目标模糊可信度的农业水分优化配置模型。并在此基础上，得出了一种基于多源耦合的多目标优化配置方法^[67]。水资源-能源系统的不确定性则来自数据不确定性，例如参数的不确定性（经济参数和技术参数），而在能源-粮食系统主要的不确定性则来自经济参数。针对上述不确定参数，有各种不确定处理方法，这些方法之间的主要区别在于用于描述输入参数的不确定性的不同技术。例如，模糊方法使用隶属度函数来描述不确定参数，而随机方法使用概率密度函数。在 WEF 系统中深入分析这些不确定性，例如与需求相关的所有不确定性（包括需求预测、气候变化对需求的影响以及需求侧管理的影响）产生的累积不确定性范围几乎是参数相关的不确定性的总和的两倍。

而本文引入信息差距决策理论（IGDT）提供了一种在缺乏足够信息在无界不确定性范围内满足系统标准而解决系统内部不确定性的能力，并已广泛应用于工程领域各学科^[68]。IGDT 理论采取了有针对性的方法探索这种无界的不确定空间^[69]。通常我们

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/918046071077006112>