

“双碳”目标下的流域综合管理多目标协同发展决策研究

Shuifeng Zhang^{1*}, Meng Li², Zheyang Gu³

¹*School of Information Technology, Nanjing Police University, Nanjing, Jiangsu*

²*Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau., Nanjing, Jiangsu*

³*Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu*

【摘要】流域系统作为连接上下游的开放的生态经济单元，在实现碳达峰与碳中和目标中发挥着至关重要的作用。本研究在分析流域碳管理的基础上，构建了流域尺度碳减排多目标规划模型，以碳减排成本最小和综合生态效益最大化为目标，综合考虑环境约束、资源约束和技术约束，利用多目标规划算法获得流域碳减排优化策略和空间配置方案。并通过典型流域案例研究，验证了模型的科学性与实用性。本研究为流域系统碳排放管理提供了量化方法与决策支持，具有创新价值。

【关键词】流域系统；碳减排；多目标规划；决策支持

【基金项目】2022 年度高等学校哲学社会科学一般项目“人工智能驱动的长江流域综合管理多目标协同发展决策模型研究”（2022SJYB0091）；2022 年度江苏省社科基金项目“人工智能驱动的农业流域综合管理多目标协同优化决策模型研究”（22GLD011）；2022 年度江苏高校“青蓝计划”

【收稿日期】2025 年 3 月 15 日

【出刊日期】2025 年 4 月 15 日

【DOI】10.12208/j.wrrm.20250005

Research on Multi-objective Collaborative Development Decision-making of Integrated Watershed Management Under the “Dual Carbon” Target

Shuifeng Zhang^{1*}, Meng Li², Zheyang Gu³

¹*School of Information Technology, Nanjing Police University, Nanjing, Jiangsu*

²*Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau., Nanjing, Jiangsu*

³*Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu*

【Abstract】 Watershed systems, as open ecological and economic units connecting upstream and downstream, play a crucial role in achieving carbon peak and carbon neutrality targets. This study based on the analysis of watershed carbon management, constructs a multi-objective planning model for carbon emission reduction at the watershed scale. The model aims to minimize carbon reduction costs and maximize comprehensive ecological benefits, considering environmental constraints, resource constraints, and technological constraints. It utilizes multi-objective planning algorithms to obtain optimized strategies and spatial allocation schemes for watershed carbon emission reduction. The model is applied to case studies in typical watersheds to validate its scientific rigor and practicality. This research provides quantitative methods and decision support for carbon emission management in watershed systems, offering innovative value.

【Keywords】 Watershed systems, Carbon emission reduction, Multi-objective planning, Decision support

1 简介

中国已提出力争 2030 年碳排放达峰、2060 年碳中和的宏伟目标，对区域和行业提出了更高的要求^[1,2]。流域作为连接上下游、调控水资源和生态环

境的重要地理单元，在实现“双碳”目标中发挥着独特作用。流域是一个涉及点源污染、面源污染、生态系统碳汇等的复杂系统，需要综合考虑多种因素，进行系统、协调管理。因此，开展“双碳”目标下流域

*通讯作者：Shuifeng Zhang

注：本文于 2024 年发表在 OAJRC Environmental Science 期刊 5 卷 1 期，为其授权翻译版本。

综合管理的多目标协调发展决策研究,对指导流域实现碳达峰和碳中和目标具有重要的理论价值和现实意义。流域综合管理是指统筹考虑流域内水资源、土地、生态环境等各要素,采取综合调控措施,实现流域可持续发展的管理活动^[3,4]。“双碳”目标要求通过节能减排措施实现碳达峰和碳中和。流域综合治理与“双碳”目标具有内在的统一性和协同性。一方面,实施流域综合治理可以增加碳汇、减少碳源,为实现“双碳”目标提供支撑;另一方面,“双碳”目标为流域管理指明了新的方向。但在统筹管控各类碳源、优化碳汇配置、实现流域经济社会发展与生态环境保护的协调发展等方面仍面临诸多挑战。本研究在引入“双碳”目标的背景下,以流域为单元,考虑流域内碳源结构、碳汇分布、减排约束的复杂性,构建协调碳源削减与碳汇增减的多目标规划模型,实现流域综合治理与“双碳”目标的有效融合。同时,基于最新的研究成果,从理论和实践两个角度全面探索流域系统实现“双碳”目标的路径与策略,为未来流域治理迈向“双碳”提供科学依据。

2 流域综合治理与“双碳”目标研究

2.1 流域综合治理与“双碳”目标的关系

流域综合治理与“双碳”目标之间存在着密不可分的内在联系。一方面,推进流域综合治理可以为实现“双碳”目标提供有力支撑;另一方面,“双碳”目标的出台也推动流域管理向更加科学化、系统化、协同化的方向发展。具体来说,流域综合治理中的许多措施可以增强流域系统的碳汇效应和碳减排能力。例如,实施水土保持措施可以增加植被覆盖度,提高流域生态系统的碳汇能力;推进环境友好的水利建设可以减少流域水土流失,降低碳源生成量^[5];发展生态农业可以减少化肥农药的使用,减少农业面源碳排放^[6]。同时,“双碳”目标为流域管理指明了新的方向,即在流域尺度上统筹碳源减排与碳汇管理,实现碳减排效果最优。这就要求流域管理模式向“双碳”目标转变,优化能源结构、发展低碳产业、提高资源利用效率、增加生态系统碳汇能力等。因此,在“双碳”目标背景下,流域综合管理需要创新理念、内容、方法和途径,实现管理模式的转型升级。具体来说,流域管理的核心理念应向碳减排与生态修复双驱动转变,立足流域尺度,统筹碳源减排与碳汇管理;管理内容和技术方法应向精细化、量化

发展,建立流域碳源清单与碳汇评估体系,开展多情景减排潜力评估与路径优化;管理方式应向政府主导、多利益相关方参与转变,利用市场机制实现系统化、协同化管理。

2.2 流域系统多源污染联合减排策略

流域系统中存在点源、面源等多种形式的污染,需要系统设计和协调的联合减排策略,才能达到综合减排效果。流域系统是一个开放的大系统,工业、生活、农业等人类活动产生的污染以点源、面源的形式存在,这些多源污染物的累积,构成了流域环境总污染负荷。针对不同类型污染实施单一的减排措施难以解决流域污染问题,需要从整体、系统的角度设计多源污染的联合减排策略。具体来说,流域系统多源污染的联合减排策略应坚持污染负荷平衡的原则,在流域系统入口减少污染物的输入,在系统内减少污染的产生,在系统出口增强净化能力。对于点源污染,可以实施清洁生产、应用最佳可行技术,从源头减少排放。对于面源污染,可以推广农业精准施肥、循环农业等措施,减少农业面源排放^[7]。此外,应努力提升流域生态系统对污染物的净化能力,如通过植树造林、建设湿地等,提高生态系统对污染物的吸收和转化能力。此外,需要加强流域环境管理体系建设,包括实行排污许可证制度和多方监管,实现污染防治联动。科学制定多源污染联合减排策略,需要建立流域多源污染模型,预测不同减排措施对流域环境质量的影响。此外,减排措施的选择需要经过多目标评价和优选,兼顾经济效益、社会效益和生态效益。

2.3 流域碳吸收评估与碳减排路径选择

合理评估流域碳汇分布、优化选择碳减排路径是实现流域“双碳”目标的关键。流域系统作为连接上下游的生态经济区,在气候调节、环境净化等方面发挥着重要作用,流域系统内的植被、水体、土壤是重要的碳汇库,能够吸收和封存大量碳元素。因此,准确评估流域碳汇的空间分布和数量是制定碳减排战略的基础。目前,评估方法主要有基于遥感的植被碳储量估算和基于样地的森林碳储量调查,但不同的方法可能得出不同的结果,准确的评估需要多种数据源的结合。在明确流域碳汇分布的基础上,需要系统地设计流域碳减排路径。减排路径选择需要考虑流域碳排放源结构、碳汇调控潜力、技

术减排难度等因素。一般应优先通过造林、湿地修复等措施,最大化发挥流域碳汇潜力;其次,应通过选择高效、低成本的减排技术,如推行清洁生产、低碳技术等,控制主要排放源;最后,应综合运用各部门措施,相互支撑,实现系统的减排目标。优化的减排路径能以最小的成本实现最大的减排效果。减排路径选择需要利用量化模型,运用多目标规划、系统动力学等方法,在满足环境与经济目标的同时,获得流域减排的最优策略组合,并考虑路径优化的动态演化过程,多阶段联动,实现流域的渐进式低碳转型。

3 流域碳排放多目标规划模型

3.1 模型假设与目标函数确定

构建适用的流域碳减排多目标规划模型,需要做出合理的模型假设,定义一个既能反映问题本质、又能兼顾各项目标的目标函数。首先,模型假设应基于流域碳排放规划的基本特征。例如,可以假设研究期内社会经济发展趋势保持不变,流域内各行业碳排放强度维持在现有水平。这些假设简化了问题,使研究在一定时间范围内呈现相对稳定的状态。同时,假设还应考虑不同减排措施的技术特点和实施难度,使其更贴近现实。基于这些假设,需要定义反映经济、环境和社会目标的目标函数。可以以碳减排总量作为单一目标函数,表示流域碳减排的有效性;也可以将目标设定为最小化经济成本,即以最低的成本实现减排。此外,还可以纳入增加就业、最大化生态效益等目标,利用多目标规划,在约束条件下使各目标函数最优化,得到帕累托最优解。目标函数的确定还应考虑不同部门、不同区域之间的协同作用和效率提升,例如,可以设定跨部门或跨区域的联合减排目标,使整体减排效果最大化;也可以将减排目标分解为不同的阶段,以呈现动态、渐进的减排路径。合理的目标函数设置是建立有效的碳减排规划模型的关键。最后,还需要研究确定目标函数的量化指标和计算方法,例如,可以根据碳排放清单和各子系统的减排系数计算碳减排量,将其折算成投资额来估算经济成本。目标函数的具体构建需要充分考虑问题的特点和数据获取的可行性,以保证所构建模型的科学性和实用性。

3.2 约束设置与决策变量定义

合理的约束设置与决策变量的确定是构建流域

碳减排多目标规划模型的关键步骤。首先,需要根据流域碳排放管理的特点设置各类约束,如环境约束,可以设定减排率超过一定值或者碳排放总量低于一定限度;经济约束,可以设定总投资额不超过可用资金;资源约束,可以根据可用土地、水资源等限制来设置;此外,减排规划还应满足社会发展需要,可以设置增加就业等社会约束。约束反映了减排过程中必须满足的各种要求,对模型的结果起到屏蔽和修正的作用。其次,需要确定规划模型中的决策变量,即减排措施的优化组合与配置。减排措施变量可以包括优化能源结构、提高工业能源效率、发展低碳农业等,此外,还可以将不同区域的减排量设置为决策变量,表示空间优化配置。决策变量的合理定义应在综合考虑减排措施类型并与约束条件相匹配的基础上。在定义决策变量时,还需要确定变量值的范围及其离散的数量特征,例如某项措施的减排量可以是连续变化的,也可以是预先在几个离散的层次上指定的,变量值范围的设定应考虑该措施的技术可行性和资源保障能力。通过设置合理的约束条件和决策变量,规划模型保证了碳排放管理各个环节的反映,提供了获得最优解的可能性。

3.3 解决算法的选择与设计

求解算法的选择与设计是建立碳减排多目标规划模型的关键,直接影响问题求解的效率和结果的可行性。首先,需要根据模型的复杂程度、约束条件、目标函数形式等选择合适的基础算法,例如线性规划、非线性规划、动态规划等;此外,对于多目标优化问题,还可以选择多目标进化算法、帕累托优化等方法。算法的选择既要考虑模型特点,也要考虑求解效率。然后,对选定的基础算法进行设计和改进,增强其求解能力,例如,采用启发式规则缩小解空间,加快收敛速度;设计混合算法,综合不同算法的优点;采用并行设计,通过分布式计算提高效率等。算法设计时,要考虑问题的特点,改进搜索规则,避免陷入局部最优。最后,需要对算法的可行性和有效性进行测试。算法逻辑性可通过小规模样本验证,通过灵敏度分析等方法评估求解效率,通过充分的调试和测试评估算法的稳定性,确保算法求解规划模型的有效性,得到全局最优或近优解。综上所述,求解算法的选择和设计直接影响碳减排多目标规划的可操作性,需要根据具体问题和模型

特点选择或设计高效、结果可靠的算法，为解决复杂的规划问题提供支持。

3.4 模型案例分析及结果

通过典型流域的模型案例分析，验证碳减排多目标规划模型的科学性、先进性和实用性。首先，从不同经济发展水平的流域中选取案例，代表各类流域系统的特征。在充分数据支持下，建立多目标规划模型，设置不同发展情景下的约束条件和目标函数。然后，利用选定的解算法，得到多种情景下的碳减排效果等指标。对模型结果进行多角度分析，分析不同情景下碳减排效果的差异，验证模型可以提供减排优化解决方案。评价经济和社会影响，说明模型能够兼顾综合效益。此外，对结果进行敏感性和稳健性分析，检验模型和算法的科学性。案例验证表明，构建的模型可以为基于不同流域特征的碳减排策略提供系统、量化的支持，相比传统实证方法，可以取得更好的减排效果。这在一定程度上验证了研究方法的先进性和实用性。当然，模型还需要进一步优化，以扩大其适用性。总而言之，基于典型案例的模型分析可以定量模拟碳减排过程，评估各种可行方案，并提供决策依据。案例验证是检验模型有效性的重要步骤，为进一步推广应用奠定基础。

4 结论

本研究构建了流域尺度碳减排多目标规划模型，为流域碳减排策略提供优化支持。通过文献分析，总结了流域碳管理的内涵、方法进展和应用需求，在此基础上设计了流域碳减排规划多目标模型框架，提出了目标函数确定、约束设置、决策变量定义、求解算法选择等建模方法。构建的规划模型能够同时考虑经济和环境约束，得到流域碳减排优化策略和空间配置方案。模型案例分析表明，所提方法能够高效求解流域碳减排问题，为决策提供科学依据。研究框架与方法具有一定的创新性，丰富了流域碳管理规划的技术手段，相比传统经验方法具有量化、最优化的特点。展望未来，仍需提高模型的通用性，拓展其在空间和时间尺度上的适用性，改进多目标算法，提升求解效率。应纳入更多约束因素，使其更加贴近实际；此外，还需要进一步开展研究推动流域碳减排规划的应用，推动技术和管理的协同创新，实现流域碳管理理论与实践的有效结合。

参考文献

- [1] Cao, W. (2022). Watershed ecological and environmental protection planning under the ‘dual carbon’ goals: concept renewal and measure adjustment, *China Population, Resources and Environment*, 32(12), 31-40. (In Chinese).
- [2] Xie, Z., Tang, M., Wang, J., et al. (2022). Research on the integrated development model of hydropower-land-wind-solar in the Yellow River Basin under the “double-carbon” target. *Yellow River*, 44(05), 5-9+14. (In Chinese).
- [3] Wang, L. (1999). *Watershed management*. Beijing: China Forestry Publishing House. (In Chinese).
- [4] Chen, Y., Wang, Y., Li, L., et al. (2016). *Study on integrated watershed management strategy in China*. Beijing: Science Press. (In Chinese).
- [5] He, J. (2023). Analysis of soil and water conservation carbon sink under the background of “double carbon” target. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, (03), 18-20. (In Chinese).
- [6] Zang, J., Zhang, S., Tang, C., et al. (2023). Spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural eco-efficiency in Guangdong Province under “dual carbon” target. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 1-13. (In Chinese).
- [7] Wu, S., Zhang, J., Guan, F., et al. (2018). Investigation and evaluation of agricultural non-point source pollution in Zhongxing Reservoir small watershed of Chaohu Lake basin, Anhui Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(02), 198-203. (In Chinese).
- [8] Chen, Z., & Gao, L. (2020). Convergence of a regularization scheme for multiobjective programs with equilibrium constraints. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 39(05), 446-450. (In Chinese).

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS