

山西五台清水河流域水资源承载力评价 与可持续发展对策研究

王旭^{1,2}, 吕国斌^{1,2*}, 赵国强^{1,2}, 高晓龙^{1,2}, 徐喆^{1,2}, 崔盛研^{1,2}, 刘飞翔^{1,2}, 刘昌吉^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025060004

摘 要 : 为破解山西五台清水河流域“生态-旅游-农业”多元用水冲突、水资源时空分布不均等问题, 支撑流域可持续发展, 本文开展水资源承载力评价与对策研究。基于可持续发展理论, 构建包含供给、需求、效率、生态4个维度14项指标的三级评价体系, 采用 AHP-熵权组合赋权与模糊综合评价模型, 对流域 2018–2022 年水资源承载力进行实证分析。近5年流域水资源承载力处于中等水平(综合隶属度 0.38–0.45), 供需平衡脆弱, 核心制约因素包括水资源总量不足、时空供需错配、用水效率偏低、生态用水保障不足及旅游季节性用水压力。结合流域“山地生态型流域+旅游经济核心区”定位, 从优化水资源供给配置、强化节约集约利用、保护水生态环境、创新管理机制四个维度构建可持续发展对策体系, 为五台山生态保护与五台县社会经济高质量发展提供水资源支撑。

关 键 词 : 清水河流域; 水资源承载力; 模糊综合评价; 组合赋权法

Research on the Evaluation of Water Resources Carrying Capacity and Sustainable Development Strategies in the Qingshui River Basin of Wutai, Shanxi

Wang Xu^{1,2}, Lv Guobin^{1,2*}, Zhao Guoqiang^{1,2}, Gao Xiaolong^{1,2}, Xu Zhe^{1,2}, Cui Shengyan^{1,2}, Liu Feixiang^{1,2}, Liu Changji^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : To address the challenges of multi-sectoral water use conflicts among "ecology-tourism-agriculture" and the uneven spatial-temporal distribution of water resources in the Qingshui River Basin of Wutai, Shanxi, and to support sustainable development in the basin, this paper conducts a study on the evaluation of water resources carrying capacity and corresponding strategies. Based on the theory of sustainable development, a three-tier evaluation system comprising 14 indicators across four dimensions—supply, demand, efficiency, and ecology—was constructed. Utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP)–Entropy Weight Combined Weighting Method and the Fuzzy Comprehensive Evaluation Model, an empirical analysis of the water resources carrying capacity in the basin from 2018 to 2022 was conducted. Over the past five years, the water resources carrying capacity in the basin has been at a moderate level (with a comprehensive membership degree ranging from 0.38 to 0.45), indicating a fragile balance between supply and demand. The core constraining factors include insufficient total water resources, spatial-temporal mismatches in supply and demand, low water use efficiency, inadequate ecological water supply guarantees, and seasonal water use pressures from tourism. Considering the basin's positioning as a "mountain ecological basin + tourism economic core area," a sustainable development strategy system was constructed from four dimensions: optimizing water resource supply allocation, strengthening water-saving and intensive utilization, protecting the water ecological environment, and innovating management mechanisms. This provides water resource support for ecological protection in Wutai Mountain and high-quality socio-economic development in Wutai County.

Keywords : Qingshui River Basin; water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; combined weighting method

基金项目: 中国地质调查项目“浑沱河上游重点地区水文地质调查”, 项目编码: (DD20230470)。

作者简介: 王旭(1988–), 男, 本科, 助理工程师, 中国地质大学(武汉), 主要从事水文与水资源工程研究, E-mail: 415259651@qq.com

通讯作者: 吕国斌(1979–), 男, 本科, 助理工程师, 中国地质大学(武汉), 主要从事地质工程专业研究, E-mail: 249612122@qq.com

引言

水资源承载力评价是识别流域水资源支撑阈值、破解供需矛盾的核心手段，其评价结果可为水资源优化配置与可持续发展政策制定提供科学依据。目前已有研究多聚焦于平原或单一功能流域，针对山地型多元功能流域的水资源承载力评价仍缺乏针对性，尤其对“生态-旅游-农业”复合系统下的用水冲突协调、地形对水资源可利用性的影响等问题关注不足。基于此，本文以清水河流域为研究对象，结合流域自然地理特征与用水结构特点，构建科学适配的水资源承载力评价体系，运用组合赋权与模糊综合评价方法，系统分析2018-2022年流域水资源承载力演变特征与核心制约因素，进而提出针对性的可持续发展对策。

一、水资源承载力评价理论与方法

（一）水资源承载力基本理论

水资源是维持人类生存和社会发展不可或缺的自然资源，我国水资源相对短缺，且时空分布不均。近几十年来，随着全球气候变化和人类社会经济的发展，部分地区缺水形势十分严峻，水资源已成为制约地区社会经济可持续发展的“瓶颈”因素，水资源承载力研究也成为可持续发展研究和水资源安全战略研究的基础课题^[1]。水资源承载力作为衡量区域可持续发展的核心指标，指水资源在不破坏生态的前提下能支撑社会经济可持续发展的最大阈值^[2]。将其应用于清水河流域时，必须充分考虑其区域适配性，针对山地地形造成的“供给空间不均”，需评估地形对水资源可利用性的影响；面对“生态-旅游-农业”的多元用水冲突，应优先保障生态基流以维护系统稳定；同时由于气候变化与人类活动的双重影响，承载力评价还需注重其动态性与时效性。

（二）评价指标体系构建

为科学评估清水河流域水资源承载力，构建包含目标层、准则层和指标层的三级评价体系^[3]。体系遵循科学、系统、针对、可操作四大原则，并设置14项具体指标，涵盖供给、需求、效率和生态四个维度，所有指标均明确了分级标准。该体系从水资源系统的供给能力、社会系统的需求压力、经济系统的利用效率以及生态系统的保障水平四个维度进行全面评估，从而系统、精准地衡量流域水资源可持续发展的状态。

（三）评价模型选择

通过对比主流评价模型适配性，确定选用模糊综合评价模型，该模型相较于TOPSIS模型更能有效处理“承载力等级”这类模糊性评价标准，避免了后者对模糊边界处理不足的缺陷，同时相比物元模型，其计算逻辑更为简洁，更适配流域多维度指标的简单关联特征，且能整合主观权重与客观数据，让评价结果更贴合清水河流域实际情况^[4]。评价等级集合明确界定为五个层级，分别是强（V1，水资源供给充足，供需协调，生态稳定）、较强（V2，供给较充足，供需基本协调，生态良好）、中等（V3，供给一般，供需存在小幅缺口，生态基本稳定）、较弱（V4，供给不足，供需缺口明显，生态存在退化风险）、弱（V5，供给严重不足，供需失衡，生态退化），每个等级均对应清晰的内涵界定以确保评价一致性^[5]。针对正向与负向指标分别设计优化后的梯形隶属度函数，正向指标在 $x \geq$ 强等级阈值时隶属度为1，其余等级为0，在相邻等级阈值区间内按线性关系分配隶属度，负向指标则以反向逻辑设计隶属度函数，确保指标数值与承载力等

级正向关联^[6]。模糊矩阵合成选用加权平均算子（ $M(\cdot, +)$ ），避免“主因素决定型算子”忽略次要指标的缺陷，更符合流域多因素协同影响的特征，同时在评价结果得出后，结合流域季节性缺水等实际水资源供需情况进行合理性校验，确保评价结果不偏离现实。

（四）指标权重的确定

指标权重采用AHP法与熵权法组合赋权，兼顾专家经验与数据客观性。主观权重通过AHP法确定，邀请5位多领域专家对4个一级指标进行两两重要性比较并取平均值，构建1-9标度判断矩阵，经计算其最大特征值 $\lambda_{\max} \approx 4.12$ ，一致性比率 $CR \approx 0.044 < 0.1$ 通过检验，归一化后得到主观权重 $W_{\text{主}} = [0.28, 0.16, 0.10, 0.46]$ ；客观权重通过熵权法计算，以“人均水资源量”为例，3个评价单元原始数据经极差标准化后，通过指标比重、信息熵及差异系数的计算，归一化所有指标差异系数得到客观权重 $W_{\text{客}}$ ^[7]。组合权重按 $W_{\text{组}} = 0.4 \times W_{\text{主}} + 0.6 \times W_{\text{客}}$ 计算，核心指标中生态用水占比（0.12）、万元GDP用水量（0.10）等权重较高，符合流域生态优先、水资源供给约束特征，与实际需求一致，具备合理性。

二、清水河流域水资源承载力实证评价

（一）评价数据准备与标准化

本次评价以清水河流域2018-2022年为研究时段，数据整合自水文公报、统计年鉴及生态监测报告三类来源^[8]。在剔除异常值并用线性插值补充缺失数据后，采用极差标准化法处理所有数据，以消除量纲影响。该方法对正向指标（如人均水资源量）和负向指标（如万元GDP用水量）分别进行标准化转换，使所有指标数值均处于0-1区间且与承载力水平正相关，满足后续模型计算的要求。

（二）指标权重的计算

指标权重采用层次分析法（AHP）与熵权法以0.4:0.6比例组合赋权。主观权重通过构建指标层判断矩阵，经5位专家赋值及一致性检验（CR值均 < 0.1 ）后归一化得到，准则层中生态系统（0.46）、水资源系统（0.28）占比高，指标层以生态用水占比（0.11）、人均水资源量（0.08）等权重居前。客观权重基于近5年标准化面板数据，由信息熵值确定，万元GDP用水量（熵值0.82，权重0.12）、农业灌溉水有效利用系数（熵值0.85，权重0.10）等因波动大、区分度高而权重突出^[9]。组合权重前五为生态用水占比（0.114）、万元GDP用水量（0.112）、河流水质达标

率（0.094）、人均水资源量（0.088）、旅游用水占比（0.086），契合流域“生态-旅游-农业”多元属性。

（三）水资源承载力综合评价

本次实证评价以清水河流域全域为研究范围，选取近5年作为评价时间序列，数据来源主要包括三类，水文水资源数据来自山西省水文水资源公报、五台县水文监测站实测记录，社会经济数据来源于五台县统计年鉴、区域发展规划报告，生态环境数据取自五台山生态保护区监测报告、流域水环境质量公报。数据筛选过程中，重点剔除异常值与缺失值，对个别年份的缺失数据采用线性插值法补充，确保数据的完整性与可靠性^[10]。为消除不同指标量纲差异与数值范围影响，采用极差标准化法对原始数据进行处理，其中正向指标采用上限标准化公式，即标准化值=（原始数据-最小值）/（最大值-最小值），使指标数值越大对应承载力水平越高；负向指标采用下限标准化公式，即标准化值=（最大值-原始数据）/（最大值-最小值），实现指标属性的统一正向化转换。以2022年数据为例，流域人均水资源量原始值为480m³/人，最大值620m³/人、最小值310m³/人，标准化后数值为（480-310）/（620-310）≈0.55；万元GDP用水量原始值为95m³/万元，最大值130m³/万元、最小值45m³/万元，标准化后数值为（130-95）/（130-45）≈0.41，标准化结果均处于0-1区间，满足后续评价模型计算要求。

（四）结果分析与讨论

近5年清水河流域水资源承载力为中等水平（综合隶属度0.38-0.45），供需平衡脆弱，易受外部因素影响。时间上，2018-2019年因节水推广与生态用水保障小幅上升，2020-2021年受降水偏少、旅游用水增加小幅回落，2022年随降水改善、节水见效及生态修复略有回升。准则层中，水资源系统承载力较弱（平均隶属度0.35，受时空分布不均等约束），社会系统中等（0.40，生活用水压力存但旅游用水未过度透支），经济系统逐步提升（0.38，节水成效显现但工业重复利用率偏低），生态系统相对较好（0.45，水质、植被稳定但生态用水占比不足16%）。核心制约因素包括，水资源总量不足且时空供需错配、用水效率待提升（农业漫灌普遍、工业高耗水）、生态用水保障不足（枯水期基流难保障）、旅游发展带来季节性用水压力，需针对性破解以支撑可持续发展。

三、清水河流域可持续发展对策研究

（一）指导思想与基本原则

以黄河流域生态保护和高质量发展战略为遵循，立足清水河

流域“山地生态型流域+旅游经济核心区”定位，紧扣水资源承载力中等偏弱现状，坚持“节水优先”等治水思路。以破解水资源总量不足等四大制约为目标，统筹“三水共治”与“三生用水”，通过工程、技术、管理协同发力，构建可持续发展体系，为五台山生态保护与五台县发展提供水资源支撑。坚持生态优先、底线思维，严守生态与水资源底线；同时遵循供需统筹、空间均衡，优化水资源供需配置；立足实际落实因地制宜、分类施策，避免“一刀切”；以科技赋能提升用水效率，靠机制创新构建高效治理体系，保障对策长效落地。

（二）基于评价结果的对策体系构建

针对流域水资源总量不足、时空分布不均、供需错配、利用效率偏低、生态保障不足、管理分散等问题，需从四方面系统发力。优化供给配置方面，上游扩容小型水库拦蓄汛期降水，中游建设应急备用水源，下游完善灌区渠道减少输水损耗，同时推进跨乡镇水资源联动调配，优先保障生活与生态用水，通过雨水收集、再生水回用等举措提升非常规水利用，力争2027年利用率超25%；强化节约集约利用方面，农业推广高效节水灌溉技术，2027年灌溉水有效利用系数超0.78，工业推进节水改造并提高用水重复利用率至80%以上，城镇普及节水器具、修复供水管网，旅游区推行节水洁具与污水回用；保护水生态方面，明确生态用水占比不低于18%，保障枯水期河道基流，治理河道淤积与岸线破坏，上游加强水土保持力争流失控制率超85%，严控各类污染确保河流水质达标率稳定超95%；创新管理机制方面，成立流域水资源统一管理办公室，实行阶梯水价与水权交易制度，构建智能化监测监管平台，强化执法与宣传教育，营造全社会参与水资源保护的良好氛围。

四、结束语

本文以山西五台清水河流域为研究载体，聚焦“山地生态型流域+旅游经济核心区”的双重属性，围绕水资源承载力评价与可持续发展这一核心命题，完成理论适配、体系构建、实证分析与对策设计的系统性研究。通过构建涵盖供给、需求、效率、生态四大维度的评价体系，结合AHP-熵权组合赋权与模糊综合评价模型，精准揭示了流域2018-2022年水资源承载力处于中等水平的核心特征，明确了水资源总量不足、时空供需错配、用水效率偏低等关键制约因素，为流域水资源治理提供了量化依据与问题导向。

参考文献

- [1] 刘志明, 周召红, 王永强, 等. 区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 145-150. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.03.025.
- [2] 何光荣. 饶河源水资源承载力评价及可持续发展研究[D]. 江西: 南昌大学, 2011. DOI: 10.7666/d.y1942706.
- [3] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1293-1298.
- [4] 田杨杰. 成都市相对水资源承载力评价与可持续发展研究[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(13): 53-55. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7103.2019.13.021.
- [5] 曹飞凤, 楼章华, 许月萍, 等. 钱塘江流域水资源承载力及可持续发展研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(4): 13-16, 25.
- [6] 赵杰君, 陈森林, 林婵. 区域水资源承载力与可持续发展[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(1): 184-185. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7973-C.2009.01.095.
- [7] 郭浩锋, 袁艳斌, 曹阳, 等. 武汉市水资源承载力综合评价及可持续利用研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 19-23. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381.
- [8] 宋晓猛, 杨小芳, 张玲, 等. 江苏省水资源承载力评价及可持续利用对策[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 72-73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.04.033.
- [9] 张玲, 宋晓猛, 赵磊. 区域水资源承载力与可持续发展研究[J]. 现代商贸工业, 2009, 21(12): 3-5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3198.2009.12.002.
- [10] 朱龙军. 基于承载力与多系统协调性分析的区域水资源发展状况研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2021.