

基于“量化—区划—优化”的山地城市水资源配置 ——以重庆为例

刘亚丽^{1,2}, 卢涛^{1,2}, 刘方^{1,2}, 吴君炜^{1,2}, 张臻^{1,2}, 杨乐^{1,2}, 闫晶晶^{1,2}, 吴芳芳^{1,2}

(1. 重庆市规划设计研究院, 重庆 401147; 2. 自然资源部国土空间规划监测评估预警
重点实验室, 重庆 401147)

摘要: 鉴于全域国土空间水资源优化配置方法体系尚未建立, 且国内外已有水资源配置研究的视角、思路、尺度单一, 文章融合国土空间系统规划思维和科学治水理念, 聚焦水资源利用突出问题及均衡配置的迫切需求, 提出基于“量化—区划—优化”的山地城市国土空间水资源配置的方法。其中, “量化”是基于“当地、过境、再生”多种水资源支撑和“资源、生态、安全”多重要素约束, 构建水资源可利用潜力的评价方法; “区划”是锚固山地水资源时空分布、演变规律、主要问题、发展诉求, 建立水资源需求预测、供需平衡、区域平衡的方法; “优化”是按照“总量平衡—分区平衡—系统均衡”的研究导向, 建立国土空间水资源优化配置的方法。并以典型山地城市重庆市为例, 开展实证研究, 以推进山、水、城、人高度匹配和有机融合, 为提高重要区域水资源承载能力, 构建全域统筹、系统完备、调控有序、丰枯相济的水资源配置体系, 提供基础方法引导和关键技术支撑。

关键词: 山地城市; 国土空间; 水资源配置; “量化—区划—优化”; 重庆市

中图分类号: X24; F062.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6995 (2023) 01-0000-00

DOI: 10.19676/j.cnki.1672-6995.001060

Water Resource Allocation in Mountain Cities Based on "Quantification - Zoning - Optimization" —A Case Study of Chongqing

LIU Yali^{1,2}, LU Tao^{1,2}, LIU Fang^{1,2}, WU Junwei^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2},
YANG Le^{1,2}, YAN Jingjing^{1,2}, WU Fangfang^{1,2}

(1. Chongqing Institute of Planning and Design, Chongqing 401147, China; 2. Key
Laboratory of Monitoring, Evaluation and Early Warning of Territorial Spatial Planning
Implementation, Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, Chongqing 401147,
China)

Abstract: In view of the fact that the method system of optimal allocation of global territorial space water resource has not yet been established, and the existing domestic and overseas research perspectives, ideas, and scales of water resource allocation are single, the paper integrates the planning thinking of territorial space and the concept of scientific water management, focuses on the prominent problems of water resource utilization and the urgent need for balanced allocation,

收稿日期: 2024-01-31; **修回日期:** 2024-04-23。

资助项目: 重庆市自然科学基金面上项目“江上游山地城市水资源协同规划关键技术研究”(CSTB2023NSCQ-MSX0883); 重庆市建设科技计划项目“碳中和目标下的山地城市绿色生态空间格局构建研究”(城科字 2022 第 6-13 号)

作者简介: 刘亚丽(1974—), 女, 河北省承德市人, 博士, 重庆市规划设计研究院正高级工程师, 注册城市规划师, 主要从事水资源规划、水生态修复、水环境保护等研究工作。

通讯作者: 卢涛(1972—), 男, 重庆人, 博士, 重庆市规划设计研究院院长, 国务院特殊津贴专家, 自然资源部科技领军人才, 主要从事国土空间规划和研究工作。Email: 264354384@qq.com。

presenting a method of territorial spatial water resource allocation for mountain cities based on "quantification - zoning - optimization". Among them, "quantification" is to construct an evaluation method of water resource availability potential based on the support of multiple water resources of "local, transit, renewable" and constrained by multiple factors of "resource, ecology, security"; "zoning" is a method to anchor the spatial and temporal distribution, evolution law, major problems, development demands of mountain water resource, and establish water resource demand forecast, supply-demand balance and regional balance; "optimization" is a method to establish the optimal allocation of water resource in territorial space according to the research orientation of "total balance - regional balance - system balance". Plus, taking the typical mountain city of Chongqing as an example, empirical research was carried out to promote the highly matching and organic integration of mountain, water, city, and people to provide basic method guidance and key technical support for improving the carrying capacity of water resource in essential regions and building a water resource allocation system with overall planning, complete system, orderly regulation, and balanced abundance and depletion.

Keywords: mountain city; territorial space; water resource allocation; "quantification - zoning - optimization"; Chongqing city

0 引言

山地城市作为区域水资源战略储备库，发挥着水源涵养、水土保持、战略储备等重要作用，肩负着保护和发展等多重使命，对于构筑区域水安全屏障至关重要^[1-4]。同时，山地城市自然地理、生态环境、气候水文复杂多样，地形高差大、山水阻隔多，城市分散式布局、组团式发展，呈现出水资源时空分布不均、水利发展区域间不平衡、人口经济与资源环境不匹配、水安全保障问题突出等显著特征。亟需开展水资源优化配置研究，满足山地区域可持续发展的迫切要求。

自 19 世纪末 20 世纪初人类开始关注水资源规划，水资源配置研究从定性探讨逐步走向定量分析。20 世纪 20 年代，美国学者首先应用数理统计进行水资源调配计算，随后苏联学者形成了较完整的水资源配置数理统计方法。20 世纪 70 年代，系统分析方法在水资源配置研究中得到广泛应用。20 世纪 80 年代，GIS 被应用于水资源规划和管理，水资源优化配置研究达到空前鼎盛^[5-8]。进入 21 世纪，国内外众多学者持续集成数字地理和空间模型方法开展水资源配置研究。黄军等针对合肥市水资源集约利用水平不高、供水体系不完善、生态用水保障能力不强等问题，结合现状为在建和拟建的水利工程体系构建水资源配置模型，提出了水资源优化配置方案^[9]。闫强等通过建立降雨量-径流量模型，在保证河道生态用水前提下，通过优化城乡生活用水、农业用水指标，合理调蓄灌溉高峰期工业用水，按双保证率对可置换水资源进行优化配置^[10]。王菲通过引入水资源平衡指数和水资源负载指数，基于水资源承载力综合评价和水资源供需平衡，开展玉林市水资源优化配置研究^[11]。庄维刚通过设计基于人工鱼群算法的区域水资源优化配置方法，开展水资源优化配置随机研究测试，构建适合区域水资源多目标优化配置的方法体系^[12]。周子杰建立耦合水资源供需均衡的水资源配置模型，开展规划水平年水资源供需平衡，为区域水资源优化配置提供参考^[13]。赵伟等在分析水资源本底条件的基础上，从水源开发、资源配置、体系构建等方面剖析主要问题，提出河北省水资源优化开发、科学配置、高效利用总体布局 and 主要措施^[14]。

当前，国内外学者大多基于自身学科背景、学术领域和研究方向开展水资源配置研究^[1-22]，研究视角、思路、尺度单一，尚未建立全域国土空间水资源配置方法体系。而山地水资源配置是涉及众多领域、众多尺度、众多要素的交叉性、综合性研究，亟需抓住新一轮国土空间规划契机，以发挥国土空间规划“战略性、引领性、协调性”为切入点，聚焦“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的科学治水思想，立足山地城市“水资源时空分布不均、区域间发展不平衡”等特性，以及“水源可统筹、水量可互补、水网可共建、水利可共享”等潜质，因地制宜构建水资源配置方法体系，以此填补山地城市国土空间水资源均衡配置研究空白，高质量推进山、水、城、人融合发展。

1 山地城市国土空间水资源优化配置方法构建

1.1 水资源配置方法框架

1.1.1 特性分析

山地城市多承载着区域水源涵养、水土保持、水资源战略储备等重要功能，因自然地理、气候水文、资源环境空间分布差异等原因，水资源及其利用与非山地城市大不相同，特性归纳如下：

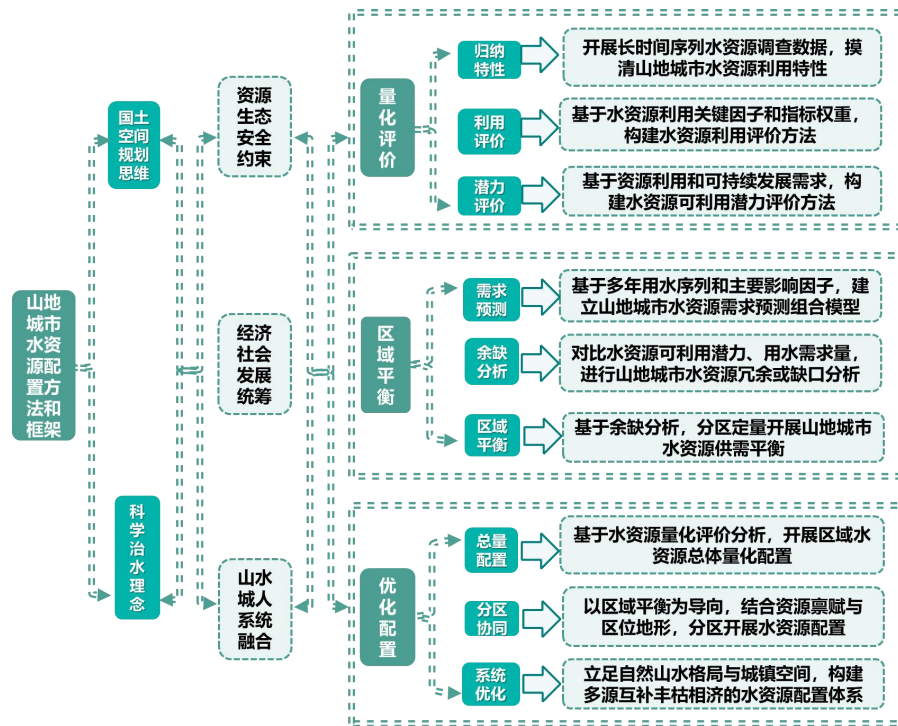
一是水资源时空分布不均衡。山地城市地表径流主要依靠大气降水和高山融雪补给，因山地气候水文和地理环境复杂，地形起伏较大，水气空间分布不均，造成高海拔地区降水丰富但缺乏过境水资源支撑，低海拔地区当地水资源相对不足且过境水资源分布差异极大。同时，山地城市丰水期与枯水期的水资源量差别大，如典型山地城市重庆汛期水量占全年水资源量的80%以上，非汛期则不足20%，丰水期易引发洪涝灾害，枯水期由于连晴、高温易形成旱灾。

二是区域间水利发展不平衡。山地城市的高山深壑区域，由于水资源调配难度大、取水成本高，加之地形破碎、生态环境脆弱、气候环境不适宜，城镇、产业、耕地、人口分布较少，水资源取用量较低；低山丘陵或坪坝地区因用地条件好、气候环境条件适宜、交通便利，城镇、产业、耕地、人口分布密集，水资源取用量较高。山地城市水资源总体表现为高山深壑区域用水困难、平坝低丘区域取水过度，水资源利用时空差异大，区域间水利发展不平衡，山、水、城、人匹配度低。

1.1.2 方法构建

基于山地城市人水不匹配、不均衡的问题，须立足国土空间系统规划思维和科学治水思想，按照“量化-区划-优化”的逻辑框架，以水资源“综合评价-区域平衡-系统协同”为研究导向，构建山地城市水资源优化配置方法框架：基于“当地、过境、再生”多重支撑和“资源、生态、安全”多重约束，构建水资源可利用潜力分析评价方法；锚固山地水资源时空分布、主要问题、变化趋势、发展诉求，建立水资源需求预测、供需平衡与区域平衡方法；根据生活空间、生产力布局、生态安全需求，提出山、水、城、人高度融合的水资源优化配置方法，为构建全域统筹、系统完备、调控有序、丰枯相济的水资源配置体系提供方法支撑。

山地城市国土空间水资源优化配置方法框架详见图1。



1.2 水资源综合评价方法

本文从水资源利用、可利用潜力两个方面，构建山地城市国土空间水资源综合评价方法。构建遵循的原则是：水资源利用评价可以较全面地掌握山地城市水资源利用效率、区域差距和总体水平；水资源可利用潜力评价可以量化和评判可利用水资源时空分布规律，科学推进以水定城、以水定人，并有效指导水资源区域统筹及优化配置。

1.2.1 水资源利用评价

1.2.1.1 评价方法

山地城市水资源利用评价，是通过考察水资源及其利用与生态环境、经济社会的时空关系开展的分项对比和评价。本文在总结国内外相关研究的基础上，基于山地城市长时间序列水资源利用数据分析，应用指标量化及加权平均法提出国土空间水资源利用评价方法，以此判定水资源可持续利用水平、差距与发展趋势，计算公式如下：

$$W_i = \sum_{j=1}^n \mu_j X_{ij} \quad (1)$$

式中， W_i 为第*i*年的综合评价值； X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标的评价值； μ_j 为第*j*项指标的权重。

1.2.1.2 评价指标

水资源利用评价应综合考虑水资源、水生态、水安全目标要求，为经济社会发展提供全面支撑。本文以自然系统、生态系统、经济社会系统为框架层，以降水、汇水、保水、护水、供水、用水（源、汇、屏、域、城、人）为基准层，构建水资源利用评价指标体系（表1）

①。指标遴选要求如下：一是对标对表水资源、水生态、水安全目标，在资源集约、环境友好、安全韧性等领域具有重要指导性；二是对标对表山地国土空间水资源规划管控要求，具有山地适用性和空间指导性；三是能够准确反映山地水资源、水生态、水安全综合特征，得到业内广泛认同，具有权威性、代表性、可量化性。

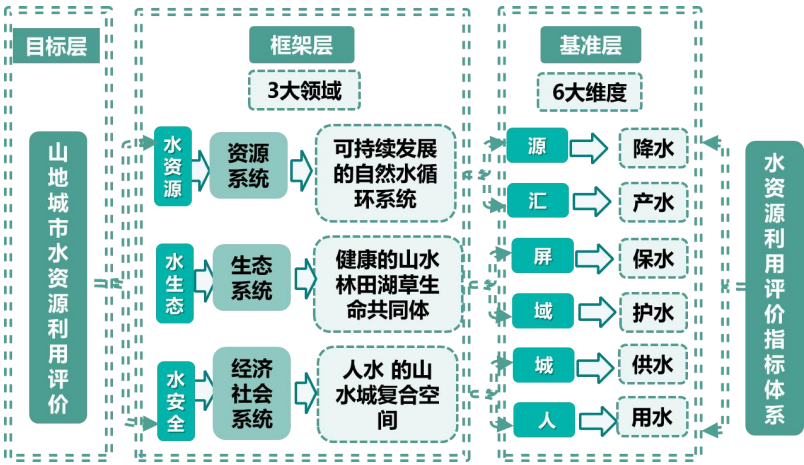


图 2 山地城市国土空间水资源利用评价指标体系

1.2.1.3 评价标准

本文基于山地城市长时间序列水资源利用调查，运用归一化法将指标标准化值和综合数值转化为等级值，建立评判值与标准化值关联，采用等间距分级方式建立等级对应关系，构建国土空间水资源利用评价指标体系（表 1）。

表 1 山地城市水资源利用评价指标体系及其赋值标准

框架层	基准层	指标层	指标得分赋值标准
水资源（资源系统）	源（降水）	年降水量（毫米）	处于年均水平为 100 分，增加或减少 1%，扣 1 分
		年水资源总量（亿立方米）	处于年均水平为 100 分，增加或减少 1%，扣 1 分
		人均水资源量（立方米/人）	达到 3000 立方米/人为 100 分，每增加 1%扣 1 分
	汇（汇水）	产水模数（立方米/平方千米）	处于年均水平为 100 分，增加或减少 1%，扣 0.01 分
		特大洪涝灾害发生频率（年）	100 年遭遇 1 次或不足 1 次特大洪涝灾害为 100 分，每减少 1%，扣 1 分
水生态（生态系统）	屏（保水）	生态保护红线面积比（%）	达到 30%为 100 分，每减少 1%扣 4 分
		森林覆盖率（%）	达到 60%为 100 分，每减少 1%扣 1 分
		人均公园绿地面积（平方米/人）	达到 16 平方米/人为 100 分，每减少 1%扣 1 分
	域（护水）	河湖水面率（%）	达到 4%为 100 分，每减少 1%扣 25 分
		重要江河湖泊水功能区达标率/%	达到 100%为 100 分，每减少 1%扣 2 分
水安全（经济社会系统）	城（供水）	城镇化率（%）	达到 80%为 100 分，每减少 1%，扣 2 分
		国土空间开发强度（%）	低于 5%为 100 分，每增加 1%扣 10 分
		城乡供水普及率（%）	达到 100%为 100 分，每减少 1%，扣 5 分
		集中供水水源水量保证率（%）	达到 100%为 100 分，每减少 1%，扣 5 分
		集中供水水源水质保证率（%）	达到 100%为 100 分，每减少 1%，扣 5 分
	人（用水）	水资源开发利用率（%）	低于 10%为 100 分，每增加 1%扣 3 分

① 指标主要源于我国水利部、生态环境部、自然资源部、住房和城乡建设部等部门发布的《水资源规划规范》《城市水系规划规范》《河湖健康评估技术导则》《规划环境影响评价技术导则总纲》《城市防洪规划规范》《城镇内涝防治技术规范》《省级国土空间规划编制指南（试行）》《市级国土空间总体规划编制指南（试行）》《市县国土总体空间规划编制指南（试行）》《国土空间规划城市体检评估规程》等国家规范、地方标准和技术文件，以及 CNKI 文献期刊。每项指标概念明确、易于测算、可直接获取或通过计算获取，并具有代表性和典型性，可真实客观反映评价对象。

		人均用水量（立方米/人）	达到 220 立方米/人为 100 分，每增加 1%扣 1 分
		单位生产总值用水量（立方米/万元）	不高于 10 立方米/万元为 100 分，每减少 1%扣 1 分
		单位工业增加值用水量（立方米/万元）	不高于 6 立方米/万元为 100 分，每减少 1%扣 1 分
		亩均灌溉用水量（立方米/亩）	不高于 300 立方米/亩为 100 分，每增加 1%扣 1 分

1.2.2 水资源可利用潜力评价

水资源可利用潜力，是在满足水资源正常循环、水生态良性发展、水安全持续保障前提下的水资源可利用量。水资源可利用潜力评价是山地城市水资源科学配置的前提、基础和关键。本文以可持续发展理念为引领，在开展水资源利用评价的基础上，创建以“资源集约、生态友好、安全韧性”为主要目标和约束条件，基于“当地-过境-再生”水资源多重支撑的山地城市水资源可利用潜力计算方法框架，详见图 3。

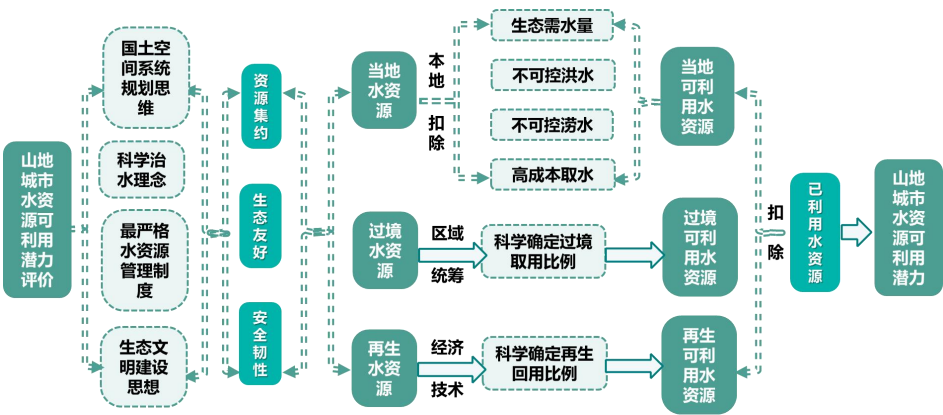


图 3 山地城市水资源可利用潜力计算方法框架

1.2.2.1 计算方法

山地城市水资源可利用潜力，主要取决于当地水资源可利用量、过境水资源可利用量、再生可利用水资源量和已利用水资源量，计算方法如下：

$$W_{\delta} = W_a + W_{\beta} + W_{\epsilon} - W_{\eta} \quad (1)$$

式中， W_{δ} 为山地城市水资源可利用潜力总量； W_a 为山地城市当地水资源可利用量； W_{β} 为山地城市过境水资源可利用量； W_{ϵ} 为山地城市再生水资源可利用量； W_{η} 为山地城市已利用水资源量。

(1) 当地水资源可利用量。当地水资源可利用量计算必须充分考虑生态基流、不可控洪水涝水、难以利用或利用代价过高的水资源量，计算方法如下：

$$W_a = W_{\lambda} - W_{\mu} - W_{\nu} - W_{\epsilon} \quad (2)$$

式中， W_{λ} 为山地城市当地水资源量； W_{μ} 为山地城市生态需水量； W_{ν} 为山地城市不可控洪水和涝水量； W_{ϵ} 为限制开发利用水量，即该发展阶段和经济技术条件下，难以开发或利用成本过高的水资源量。

(2) 过境水资源可利用量。过境水资源是沿江沿河地区重要水源，可利用量取决于过

境水总量及区域水资源规划和宏观政策，计算方法如下：

$$W_{\beta}=W_{\gamma} \times \gamma \tag{3}$$

式中， W_{γ} 为山地城市过境水资源量； γ 为山地城市过境水资源可利用系数。

（3）再生水资源可利用量。再生水资源可利用量取决于已利用水资源总量、缺水程度、经济社会发展水平、生态文明建设要求和区域宏观政策，计算方法如下：

$$W_{\zeta}=W_{\eta} \times \zeta \tag{4}$$

式中， W_{ζ} 为山地城市再生水资源可利用量； W_{η} 为山地城市已利用水资源量； ζ 为山地城市再生水资源可利用系数。

1.2.2.2 量化方法

本文基于山地城市长时间序列水资源数据调查统计和数理分析，确定生态需水、不可控洪水涝水、限制开发利用水量、过境水资源可利用量、再生水资源可利用量、当地水资源量、过境水资源量、已利用水资源量的量化方法（表 2）：

表 2 山地城市水资源可利用潜力评价量化标准

类别	量化标准	量化方法
生态需水量	建议为当地水资源量的 30%~40%	水资源利用评价（生态系统准则层）得分较高者取下限；得分低者取上限；须满足最严格的水资源管理制度
不可控洪水涝水量	建议为当地水资源量的 30%~50%	水资源利用评价（资源系统准则层）得分较高者取下限；得分低者取上限；须满足最严格的水资源管理制度
限制开发利用水量	建议为当地水资源量的 0~10%	水资源利用评价（经济社会系统准则层）得分较高者取下限；得分低者取上限；须满足最严格的水资源管理制度
过境水资源可利用量	建议为过境水资源的 0~10%	根据国家宏观调控政策、流域水资源综合利用规划、水利发展规划、最严格水资源管理制度综合确定
再生水资源可利用量	建议为已利用水资源的 0~20%	根据国家宏观调控政策、流域水资源综合利用规划、水利发展规划、再生水利用规划综合确定
当地水资源量		根据水资源公报确定
过境水资源量		根据水资源公报确定
已利用水资源量		根据水资源公报确定

1.3 水资源区域平衡方法

基于多年用水序列回归分析，建立山地城市水资源需求预测组合方法或模型；统筹各部门生活、生产、生态用水需求，开展水资源需求预测、供需平衡及区域平衡，推进水资源统筹利用和均衡利用。山地城市水资源区域平衡方法框架具体见图 4。

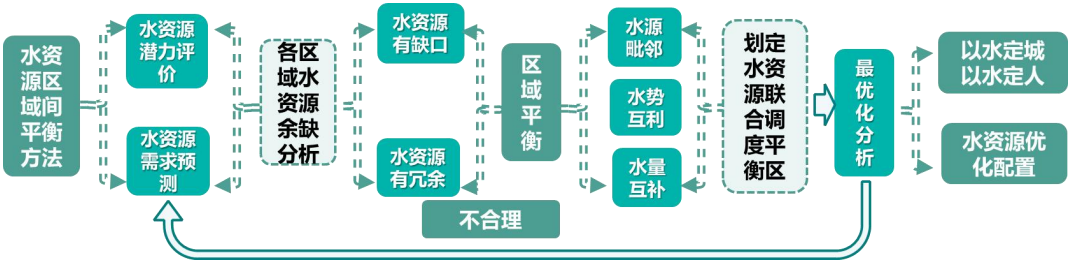


图 4 山地城市水资源区域平衡方法框架

1.3.1 需求预测

国内外水资源需求预测模型研究较多，本文在相关研究与分析对比基础上提出五种适合山地城市的预测方法：①分类指标预测模型。充分考虑各部门用水的性质、组成、数量，或者各部门需水量在总需水量中所占的比重，使不同需水量与各种影响因素或指标联系起来，

使不同性质需水量充分反映其影响因素的响应特征，达到准确预测的目的。②相关分析回归模型。根据用水量与影响因素之间的关系，建立多个自变量的回归模型，运用相关性回归分析模型寻找预测水量与影响因素之间的因果关系。③时间序列回归模型。将历史用水量随时间变化形成的序列进行加工、处理和模拟，得出规划期限需水量。④灰色系统预测模型。根据历史用水序列数据特征构造出不同的预测模型，反映和预测需水量变化趋势。⑤人工神经网络预测模型。在给定大量输入/输出信号的基础上对用水量数据进行并行处理，建立用水量非线性输入/输出模型，由计算机根据以往“经验”判断应有的输出。

1.3.2 区域平衡

山地城市水资源时空分布不均衡、水利发展区域不平衡问题突出，必须以充分发挥国土空间规划的“战略性、引领性、协调性”为切入点，立足山地城市“水源可统筹、水量可互补、水网可共建、水利可共享”等潜质，因地制宜开展区域水资源供需平衡。区域水资源供需平衡主要包括两个方面：一是余缺测算，主要是结合规划水平年水资源可利用潜力评价和需求预测，开展各区域（片区）“冗余—缺口”的量化分析。二是区域平衡，即依据“节水优先”和“空间均衡”两大原则，构建融合“分区供水+联调供水”的区域水资源动态平衡机制，通过最优化分析和方案比选，推进水资源集约利用和均衡配置。

1.4 水资源优化配置方法

运用国土空间规划系统思维，以“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的科学治水思想为导向，以水资源综合评价及区域平衡为前提，按照“总量平衡—分区协同—系统优化”的逻辑框架，构建山地城市水资源优化配置方法（图5）。

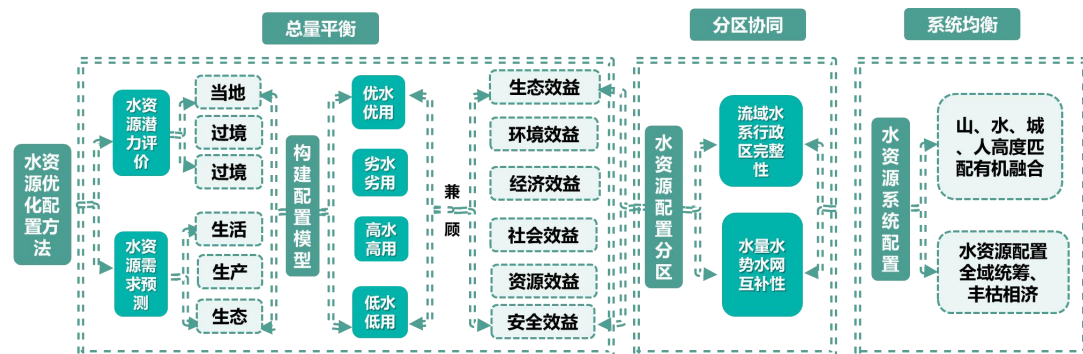


图5 山地城市水资源优化配置方法框架

1.4.1 配置顺序

取水顺序：应遵循经济高效、安全可靠的取水原则，先用自流水、蓄水，后用引水、提水、调水；先用近处水，后用远处水；先用地表水，后用地下水；先用本地水，后用过境水。用水顺序：应遵循优水优用、劣水劣用、高水高用、低水低用的用水原则，即低类别水不能供给高级用水部门，而高类别的水首先满足高级别的用水部门，在富余的情况下也可向低级别用水部门供水。各用水部门按照用水类别从高到低，依次应为生活、工业、农业和生态环境等用水部门。

1.4.2 配置模型

水资源配置主要包括三种模式：一是“以需定供”，二是“以供定需”，三是“供需兼顾”，即以区域可持续发展为目标，兼顾资源环境承载力与宏观经济发展需求的配置模式。本文构建的山地城市国土空间水资源配置方法，是基于“供需兼顾”的多目标水资源优化配置模式，追求生态、环境、经济、社会、资源、安全等综合效益。具体方法如下：

山地城市主要有4类水源（以 j 表示）：当地地表水（ $j=1$ ），地下水（ $j=2$ ），过境水（ $j=3$ ），再生水（ $j=4$ ）。用水部门分为4类（以 k 表示）：生活用水（ $k=1$ ），工业用水（ $k=2$ ），农业用水（ $k=3$ ），生态用水（ $k=4$ ）。以 j 水源分配到 k 部门的水量 x_{jk} 作为决策变量，则水资源配置决策矩阵（ R ）可表达为：

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

目标函数形式可表示为：

$$Z = \min\{f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X), f_5(X), f_6(X)\} \quad (6)$$

式中， X 为决策矩阵，由山地城市不同区域、水源和用途的水资源组成； $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 、 $f_3(X)$ 、 $f_4(X)$ 、 $f_5(X)$ 、 $f_6(X)$ 分别反映水资源开发利用的生态、环境、经济、社会、资源、安全效益。

1.4.3 配置优化

本文提出两个山地城市国土空间水资源优化配置建议：一是结合区域水资源供需平衡，科学划定水资源配置分区。充分照顾流域、水系、行政区划的完整性或毗邻性，充分考虑地形高差、供需余缺、水利建设的互补性与互利性，即通过将水量可余缺互补、水势可梯级利用、水网可共建共享的区域，划为水资源联合配置区，推进水资源统一规划、管理、调配。二是统筹水资源、水生态、水安全系统功能，实现对水资源系统配置。水资源优化配置，应从资源、生态、安全多目标出发，结合生活、生产、生态多部门用水，充分考虑已建、在建、拟建水利工程的供给能力，推进山、水、城、人高度匹配和有机融合，构建全域统筹、调配有序、丰枯相济的水安全保障体系，保证区域新型城镇化、现代工业化、现代农业化的用水需求。

2 山地城市国土空间水资源优化配置实证案例

本文以典型山地城市重庆市为例，对水资源优化配置开展实证研究。重庆市^②位于我国

^②注：重庆市主城都市区由中心城区、渝西地区和渝东新城组成，面积为3.02万平方千米。中心城区，包括渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区9区，面积为5467平方千米。渝西地区，包括位于中心城区以西的江津区、合川区、永川区、大足区、璧山区、铜梁区、潼南区、荣昌区8区，面积为1.35万平方千米。渝东新城，包括位于中心城区以东的涪陵区、长寿区、南川区、綦江区、万盛经开区、垫江县5区县，面积为1.12万平方千米。渝东北三峡库区由万州区、开州区、梁平区、城口县、丰都县、忠县、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县10个区县组成，面积为3.24万平方

地势二三级阶梯的过渡地带，自西向东横跨川中方山丘陵、川东平行岭谷和盆周山地三大地貌单元，山地面积占比超过 90%。重庆市地处三峡库区腹心地带，是长江上游生态屏障的最后一道关口，是我国重要的水源涵养、水土保持区域，肩负着保护和发展的多重使命，对于构筑我国生态安全屏障至关重要。

2.1 量化：水资源综合评价

2.1.1 基本概况

重庆境内江河纵横、湖库众多，长江自西南向东北横穿全境，流域面积大于 100 平方千米的河流 207 条，年均当地水资源量为 567.76 亿立方米，入境地表径流量达 3837 亿立方米，人均当地水资源量为 1769 立方米，接近全国人均水平的 80%（图 6）。

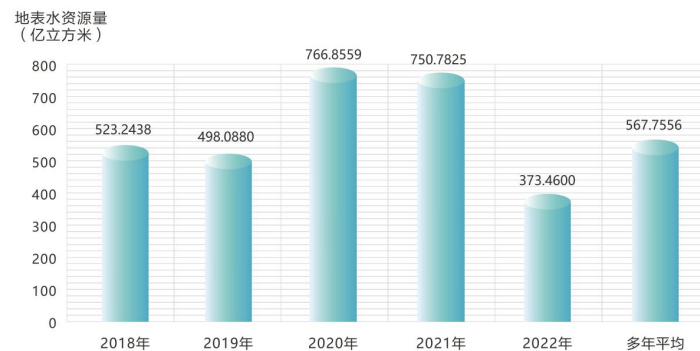


图 6 重庆水资源概况

供水相对完善。截至 2022 年，重庆市域共有大中型水库 134 座，大中型水库蓄水总量为 51.9309 亿立方米，总供水量为 68.8335 亿立方米，蓄水工程、引水工程、提水工程、非工程供水分别占总供水量的 41.38%、10.92%、47.59 %和 0.63%（图 7）。



图 7 2022 年重庆市域蓄水量、引水量、提水量情况

用水相对集约。2022 年，重庆市域总用水量为 68.3535 亿立方米，其中生产用水、生活用水、生态环境补水分别占总用水量的 73.24%、24.13%、2.63%。第一产业、第二产业、第三产业用水量分别为 27.5432 亿立方米、18.2607 亿立方米、4.6131 亿立方米，分别占总用水量的 40.01%、26.53%、6.70%（图 8）。

千米。渝东南武陵山区由黔江区、武隆区、石柱土家族自治县、秀山土家族苗族自治县、酉阳土家族苗族自治县、彭水苗族土家族自治县 6 个区县（自治县）组成，面积为 1.98 万平方千米。

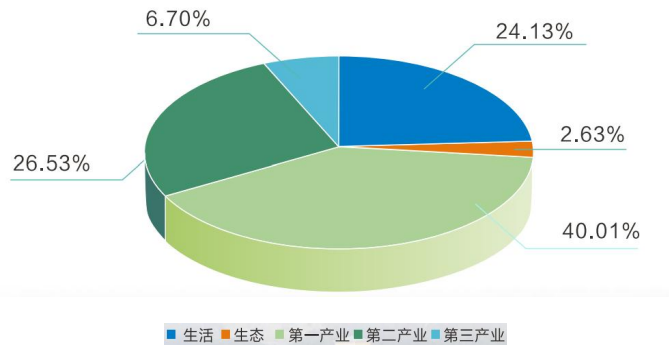


图8 2022年重庆市域用水情况

空间差异较大。重庆市主城都市区、渝东北三峡库区、渝东南武陵山区用水量占比分别为70.02%、21.85%、8.15%。

效率相对较高。重庆市人均用水量为214立方米，万元GDP用水量为23.6立方米，农田灌溉亩均用水量为313立方米，万元工业增加值用水量为20.7立方米，居民生活人均日用水量为142升，城镇公共人均日用水量为69升，农田灌溉水有效利用系数为0.5105，用水效率高于全国平均水平（图9）。

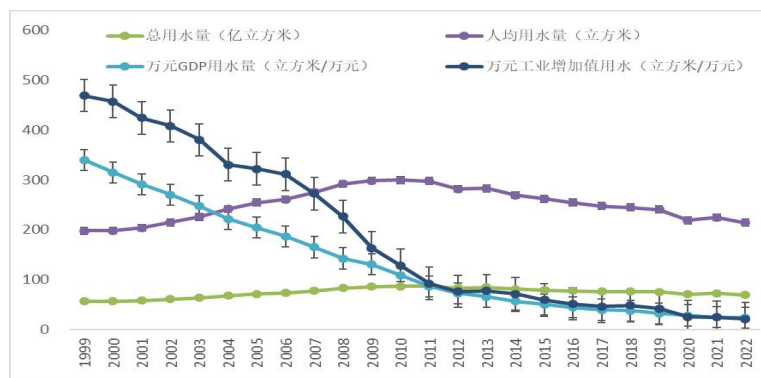


图9 重庆市主要用水指标趋势分析

2.1.2 综合评价

2.1.2.1 水资源利用评价

根据本文建立的评价指标体系，分区开展山地城市水资源利用评价（图10）。重庆市中心城区因水资源充沛、水生态本底条件好、用水效率高、海绵城市建设完善，评价得分最高；渝东北三峡库区、渝东南武陵山区，因水资源充沛、水环境优异、用水集约，评价得分相对较高；而水资源短缺、水环境容量低、水灾害治理水平滞后且用水粗放的渝西地区，尤其是璧山、大足、荣昌等典型资源型、水质型、工程性缺水区域，评价得分普遍偏低。

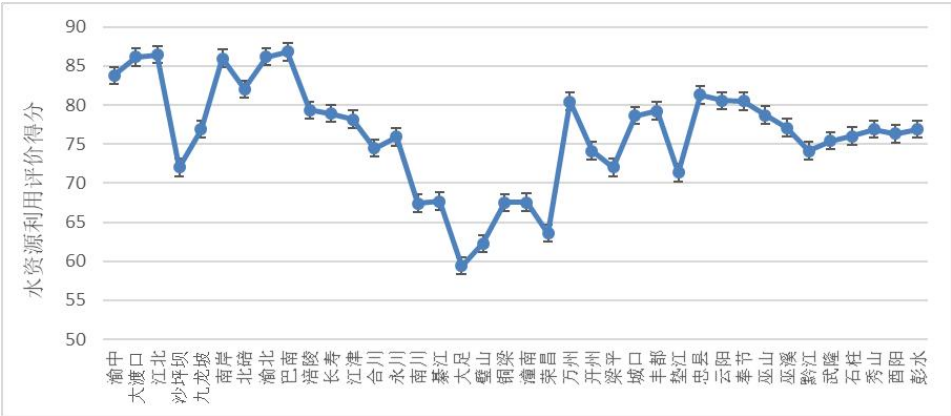


图 10 重庆市水资源利用分区评价

2.1.2.2 水资源可利用潜力评价

根据本文建立的潜力评价方法，分区开展山地城市水资源可利用潜力评价（图 11）。重庆市可利用水资源潜力总体较大，但时空分布不均，空间差异较大，尤其是渝西地区的璧山、荣昌、大足由于资源型、工程性、水质型缺水问题并存，水资源可利用潜力已为负值，自身难以满足远期发展用水需求，必须通过区域水资源统筹配置，才能科学解决水资源瓶颈问题。

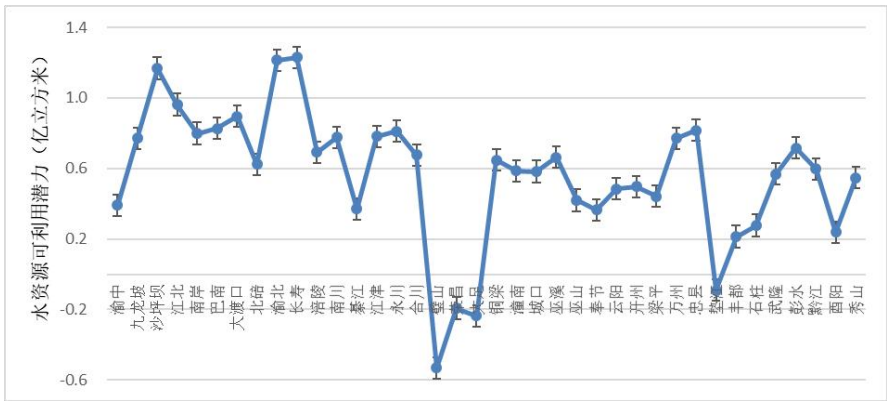


图 11 重庆市水资源可利用潜力分区评价（2022 年）

2.2 区划：水资源区域平衡

2.2.1 需求预测

结合重庆市水资源分布、利用特征与发展需求，采用分部门预测法、时间序列回归分析法、相关分析多元回归分析法，对重庆用水需求进行科学预测，并将三种预测结果对比后进行数据校正，得出低、中、高三种预测结果（表 3、图 12）。

表 3 重庆市需水量预测（保证率 97%）

类别	生活	一产	二产	三产	生态	合计
现状指标（2022 年）	142 升/（人·日）	313 立方米 /（亩·年）	20.3 立方米/万元	3.40 立方米/万元		
预测指标（2035 年）	城镇、乡村 200~250、150~200 升/（人·日）	250~320 立方米/亩·年	6~10 立方米/万元	1.0~2.0 立方米/万元		
需求预测（2035 年，低方案）	22 亿立方米	32 亿立方米	22 亿立方米	5 亿立方米	4 亿立方米	85 亿立方米

类别	生活	一产	二产	三产	生态	合计
需求预测（2035 年，中方案）	25 亿立方米	35 亿立方米	25 亿立方米	6 亿立方米	4 亿立方米	95 亿立方米
需求预测（2035 年，高方案）	28 亿立方米	36 亿立方米	30 亿立方米	7 亿立方米	4 亿立方米	105 亿立方米

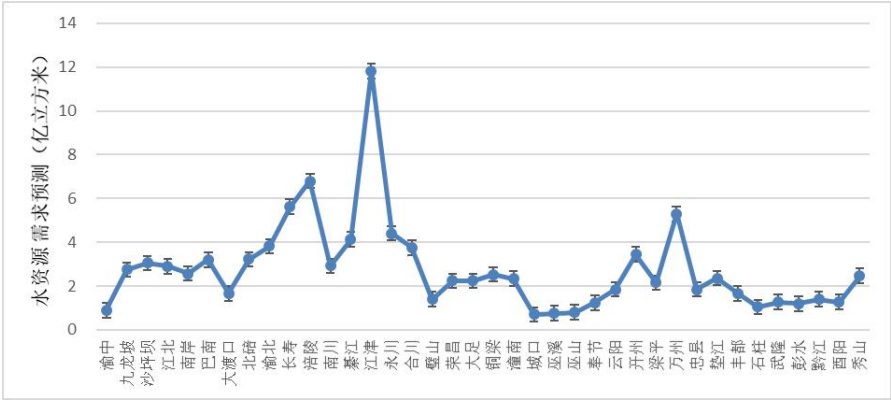


图 12 重庆市各区县水资源需求预测（高方案，2035 年）

2.2.2 区域平衡

2.2.2.1 供需平衡

根据山地城市水资源可利用潜力评价与需求预测，开展重庆市水资源供需平衡分析（图 13）。重庆市可利用水资源总量能够满足未来发展需求，但伴随人口、产业进一步向主城区集聚，渝西地区的璧山、荣昌、大足及渝东新城的綦江、垫江等典型资源型、水质型、工程性缺水地区，将面临更为严重的水资源瓶颈制约问题，亟需开展区域统筹调配。

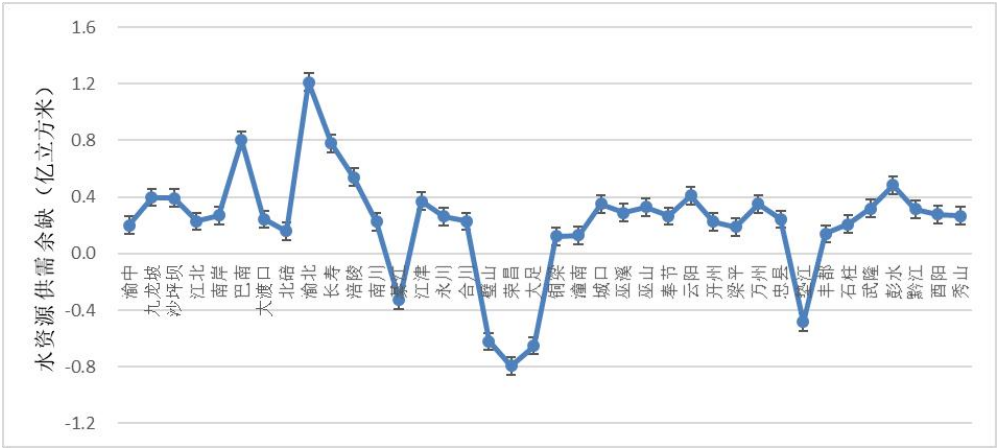


图 13 重庆市各区县水资源供需余缺（2035 年）

2.2.2.2 区域平衡

充分考虑流域、水系、行政区划的完整性或毗邻性，以及各区域水量、水势、水网建设的互补性与互利性，统筹相互毗邻的渝西地区、渝东新城等缺水地区及中心城区等水资源充沛区域，基于水量互济互补、水势梯级利用、水网共建共享的原则，科学划定主城区、渝东北三峡库区、渝东南武陵山区三大供需平衡区，科学推进水资源统筹规划和均衡配置（表 4）。

表 4 重庆市各区域水资源区域供需平衡（2035 年，高方案，单位：亿立方米）

配置分区	可利用水资源量	用水需求	供需冗余	内部平衡水量
重庆市	113.32	105.00	+8.32	2.88
主城都市区平衡区	80.28	76.61	+3.67	2.88
渝东北三峡库区平衡区	22.55	19.76	+2.79	
渝东南武陵山区平衡区	10.50	8.63	+1.87	

2.3 优化：水资源优化配置

2.3.1 配置水量

山地城市重庆兼具“水资源时空分布不均、水利发展区域间不平衡”等劣势及“水源可统筹、水量可互补、水网可共建、水利可共享”等潜质。据此，本文基于规划水平年水资源可利用潜力评价及区域平衡对重庆市进行全域和分区水量配置测算（图 14、图 15）。

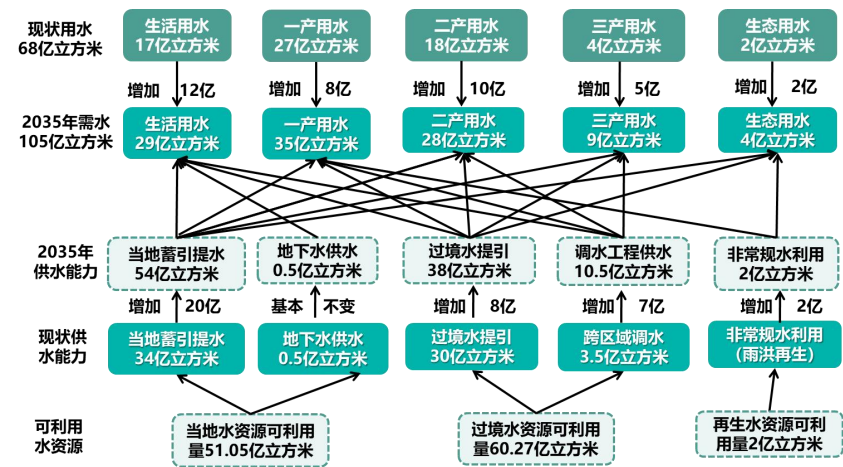


图 14 重庆市全域水资源量化配置示意图（高方案）

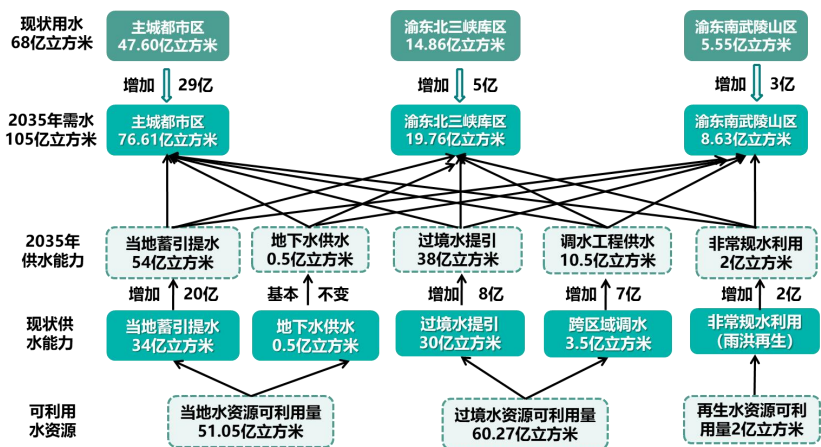


图 15 重庆市水资源配置分区量化（高方案）

重庆市主城都市区的渝中、九龙坡、沙坪坝、江北、南岸、江津、长寿、涪陵，重庆东北的万州、忠县，渝东南的武隆、彭水等沿江地区，通过强化沿江提水同时辅以当地集水达到水资源优化配置目的；重庆市主城都市区的綦江、南川、铜梁、潼南，渝东北的梁平、城口，渝东南的酉阳、秀山等降雨丰富地区，以当地水资源配置为主；渝西地区的璧山、大足、

荣昌等当地和过境双重缺水地区，采取当地集水、区域调水、再生回用相结合的水资源配置方式。

2.3.2 配置分区

首先，充分考虑重庆市地跨盆中方山丘陵、盆东平行岭谷和盆周边缘山地三大地貌单元的自然地理格局，以及长江、嘉陵江、乌江、渠江、涪江、綦江、大宁河等流域完整性；其次，注重保持各行政区的完整性与毗邻性，以利于水资源的统一规划、管理、调配；再次，将区位毗邻、水势互利、水量互补的区域尽量划为一个联合配置分区；最后，立足重庆“大山大江”的山水空间、“西密东疏”的城镇空间，结合生产力布局及生态安全需求，划定主城都市区、渝东北三峡库区、渝东南武陵山区三大水资源配置区。因三者自然地形、地理区位、资源禀赋、空间分布、配置需求差异较大，且在全域水资源配置格局中既相对独立，故宜各自分区，推进主城都市区高效引领、山区库区绿色支撑。

2.3.3 配置体系

从保护区域水安全格局出发，以自然河湖水系为基础、以引调提水工程为通道、以调储蓄滞工程为节点，构建“三区三廊·百库千网”的水资源配置体系。“三廊”即长江、嘉陵江、乌江，是重庆市的母亲河、生命线和主供水源；“百库”即指百余座大中型水库；“千网”即沟通全域的重庆水网。通过发挥优势、彰显特色、补足弱项，推进多源互补、多级连通、丰枯相济，全面提升区域水资源优化配置能力。

2.3.3.1 主城都市区“一心、二片”水资源配置体系

立足大江大河的资源条件、平行岭谷的山地地形、组团式发展的城镇布局，构建“一心、二片”水资源配置体系。一心即中心城区，依托两江（长江、嘉陵江）及其支流，梯次推动“一心”与“两片”（渝西地区和渝东新城）水源互补和水网共建，促进供水多元化、网络化发展，建成水资源高效供给和均衡配置示范区。大力推动中心城区和渝西地区（江津-璧山-永川-大足-荣昌-合川-铜梁-潼南）、渝东新城（綦江-南川-长寿-涪陵-垫江）水资源互联互通，强化供水空间统筹、互联成网、设施共享。结合主城都市区发展与需求，大力推进城乡供水一体化，采取“以大带小、以大并小、以城带乡”等方式，逐步构建城乡融合的水资源一体化配置体系。中心城区供水提质升级，以率先建成高质量发展高品质生活新范例为统领；渝西地区扩容提质，进一步提升水资源均衡配置能力；渝东新城加快建设“水源充沛、系统完备、集约高效、安全可靠”的水资源配置体系。

2.3.3.2 渝东北“一带、四片”水资源配置体系

基于重庆市东北三峡库区水源涵养与水土保持功能、山城江城特色绿色供水方式、生态产业集聚节约用水的示范作用，坚持“能集中则集中、宜分散则分散”原则，构建“一带、四片”的带状化与网络化相结合的水资源配置空间，逐步形成以水库为主、以江河提水工程为辅、蓄引提相结合的水资源配置格局。“一带”，即以长江为主要水源的丰都、忠县、万州、云阳、奉节、巫山等沿江城市配置带，建成集中与分散相结合的配置网；“四片”，即

4个一体化供水片区，依托龙溪河、普里河、澎溪河及其重要支流水系，结合跳蹬、向阳等大型水利设施建设，联动万州、开州、云阳、梁平，共建绿色配置网；聚焦“三峡库心·长江盆景”，依托大宁河、梅溪河及其重要支流水系，推进奉节-巫山-巫溪水资源优化配置；依托龙河及其重要支流水系，联动丰都、忠县、石柱水资源配置；充分发挥城口水源水能优势，建成东北高位“水塔”。

2.3.3.3 渝东南“一带、六片”水资源配置体系

依托乌江及其重要支流水系，突出渝东南武陵山区生态屏障及山区库区功能，构建“一带、六片”配置体系，打造人与自然和谐共处的均衡配置典范。“一带”，即以乌江为主要水源的沿江配置带；“六片”，即黔江、武隆、石柱、酉阳、彭水、秀山6个特色化配置片区。黔江以阿蓬江及其上游重要支流水系为主供水源，建成渝东南区域中心城市；武隆依托乌江及其重要支流水系；石柱依托龙河及其重要支流水系；酉阳依托酉水河及重点其支流；彭水依托乌江及其支流；秀山依托梅江河及其上游支流水库，建成独立完善的水资源配置体系。六区县城水资源配置体系规划注重补足短板弱项，织密织牢民生网，联动周边市县，高品质服务乌江画廊旅游示范带、武陵山区民俗风情旅游示范区，有效提升武陵山区水资源优化配置、高效供给、安全保障能力。

3 结语

本文聚焦典型山地城市重庆“水资源时空分布不均、区域间发展不平衡”等劣势和“水源可统筹、水量可互补、水网可共建、水利可共享”等潜质，提出基于“量化-区划-优化”的国土空间水资源配置方法：基于“当地、过境、再生”多种水资源支撑和“资源、生态、安全”多重要素约束，构建水资源利用及可利用潜力量化评价方法；锚固山地特性、主要问题、变化趋势、发展诉求，建立水资源需求预测、供需平衡、区域平衡方法；围绕水资源总量平衡、分区协同、系统优化，创建山地城市水资源优化配置方法，促进山、水、城、人高度匹配和有机融合。面向未来，山地水资源优化配置还应注重以下三个方面：

一是系统谋划、整体协同。以新一轮国土空间规划为契机，坚持系统观念，立足流域整体，合理解决山地水资源、水生态、水环境、水灾害问题。通过推动区域水资源优化配置，加快构建“全域统筹、系统完备，调控有序、集约高效”的山地水资源配置体系，支撑国土空间开发保护、生产力布局和重大战略实施，着力提升水资源整体效能和全生命周期综合效益。

二是以水定需、量水而行。针对山地水资源时空分布不均等特点，坚持节水优先、以水定需，量水而行、因水制宜，充分发挥水资源刚性约束作用，按照“确有需要、生态安全、可以持续”的要求，采取“控需”与“增供”相结合的举措，在深度节水控水前提下，依托山地纵横交织的天然水系和人工水道，加强顶层设计，优化总体格局，加强水资源空间配置，提高重要区域水资源承载能力，促进山地人口经济与资源环境相匹配。

三是空间均衡、兼顾公平。针对山地水利发展区域间不均衡等问题，以全面提升水安全保障能力为目标，根据山地自然地理格局、江河流域水系分布、水利基础设施网络及河湖水

系连通情况,充分发挥江河干流生命线作用,科学规划水资源配置工程,完善水利建设布局,推进互联互通、联调联供、协同防控,推进科学配水、合理用水、分质供水,全面增强山地水资源调配能力,有效提升缺水地区供水保障安全和抗风险能力。

参考文献

- [1]Holger Manuel Benavides-Muñoz,Mireya Lapo-Pauta,Francisco Javier Martínez-Solano.Global events and surge in residential water demand:exploring possible hydraulic scenarios[J].Water,2024,16(7):956.
- [2]LIU Chunjing,LIU Zhen,YUAN Jia,et al.Urban water demand prediction based on attention mechanism graph convolutional network-long short-term memory[J].Water,2024,16(6):831.
- [3]GAO Junyan,CHEN Feng,NIE Xiangtian ,et al. Analysis of the spatial spillover effect and impact transmission mechanism of China’ s water network by constructing a water transfer information weight matrix[J]. Water 2024, 16(6):809.
- [4]LI Heying,MA Huiling,ZHANG Jianchen,et al.Surface water resource accessibility assessment of rural settlements in the Yellow River basin[J].Water,2024,16(5):708.
- [5]HE Feifei,WAN Qinjuan,WANG Yongqiang,et al.Daily runoff prediction with a seasonal decomposition-based deep GRU method[J].Water 2024,16(4):618.
- [6]CHU Haibo,WANG Zhuoqi,NIE Chong.Monthly streamflow prediction of the source region of the Yellow River based on long short-term memory considering different lagged months[J].Water,2024,16(4):593.
- [7]TAO Bianshiyu,SUN Qiao,WANG Jigan,et al.Optimizing multi-scenario water resource allocation in reservoirs considering trade-offs between water demand and ecosystem services[J].Water,2024,16(4):563.
- [8]Onesmo Zakaria Sigalla,Sekela Twisa,Nyemo Amos Chilagane, et al.Future trade-Off for water resource allocation:the role of land cover/Land Use Change[J].Water,2024,16(3):493.
- [9]黄军. 基于用水总量控制的合肥市水资源优化配置研究[J]. 水利规划与设计,2023(6):25-29.
- [10]闫强,王燕. 面向双保证率的超采区供水水源水资源优化配置运用研究[J]. 水利技术监督,2022(10):121-125.
- [11]王菲,彭湘,王丽影,等. 基于供需平衡分析的玉林市水资源承载力研究[J]. 广东水利水电,2022(3):51-57.
- [12]庄维刚,董德学,王志浩. 基于人工鱼群算法的区域水资源优化配置方法研究[J]. 水利技术监督,2022(3):58-61,95.
- [13]周子杰. 基于水资源供需均衡目标模型下东兴水功能区水资源配置研究[J]. 广东水利水电,2022(1):40-46.
- [14]赵伟,张晓辉,张文,等. 河北省地表水开发利用现状及优化配置利用研究[J]. 水利规划

与设计, 2021(12):1-4.

[15]冯淑琳, 袁晓渊, 司黎晶, 等. 基于多目标遗传智能算法求解下地区水资源规划配置分析研究[J]. 水利技术监督, 2020(5):142-146, 267.

[16]贺建文. 改进萤火虫算法在地区水资源优化配置中应用研究[J]. 水利规划与设计, 2020(7):22-27.

[17]周永昌, 李长存. 基于按需比例分配法水资源优化配置模型的建立及求解探析[J]. 水利技术监督, 2019(3):134-137.

[18]何刚, 王莹莹, 阮君, 等. 基于 Dagum 基尼系数的生态安全区域差异及收敛度研究:以淮河生态经济带安徽段为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6):348-355.

[19]郭旭宁, 酆建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):62-66.

[20]黄锋华, 黄本胜, 邱静. 基于均衡系数的广东省水资源空间均衡研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(5):86-93.

[21]金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1):1-6.

[22]左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10):113-118.