

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.010

山地城市国土空间水生态安全评价关键技术

刘亚丽, 刘方, 张臻, 徐旭, 闫晶晶, 陈敏, 吴芳芳,
周钰婷, 杨新旗, 吴汉

(重庆市规划设计研究院 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: 针对山地城市自然生态本底特性,运用国土空间系统规划思维,基于宏观、中观、微观三大视角,融合生态、环境、安全三大基础学科,立足水土-水城-水系三大空间层级,构建山地城市国土空间水生态安全评价方法。厘清山、水、城生态耦合关系,锚定水土联控-水城相融-水系联动三大核心功能,对标生态文明、环境友好、安全韧性、山地适用四大要求,聚焦源-屏-城-岸-系-流六大生态维度,围绕涵水-养水/保水-护水/循水-理水/持水-治水/疏水-导水/活水-净水十二大水行动,建立山地城市国土空间“三层级、四特性、六维度、十二行动”的水生态安全评价体系。开展典型山地城市实证研究并提出“水土”是维护山地水生态安全的重要屏障,“水城”是制约山地水生态安全的关键环节,“水系”是维系山地水生态安全的生命通道,需分层分级判定“水土”“水城”“水系”潜在风险,因地制宜、因水施策。

关键词: 山地城市; 国土空间; 水生态; 安全评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0070-09

Key Techniques for Water Ecological Security Evaluation of Territorial Space in Mountain Cities

Liu Yali, Liu Fang, Zhang Zhen, Xu Xu, Yan Jingjing, Chen Min,
Wu Fangfang, Zhou Yuting, Yang Xinqi, Wu Han

(Key Laboratory of Monitoring, Evaluation and Early Warning of Territorial Spatial Planning
Implementation, Ministry of Natural Resources, Chongqing Planning & Design Institute,
Chongqing 401147, China)

Abstract: According to the natural ecological characteristics of mountainous cities, this study employs systematic territorial spatial planning thinking, based on macro, meso, and micro perspectives, and integrates three fundamental disciplines: ecology, environment, and safety. Grounded in the three spatial levels of soil and water—water and city—water systems, it constructs an evaluation method for water ecological security in the territorial space of mountainous cities. The research clarifies the ecological coupling relationships among mountains, water, and cities, anchors three core functions: integrated soil-water control, harmonious water-city integration, and coordinated water system

基金项目: 重庆市自然科学基金资助面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0883); 重庆市建设科技计划项目(城科学2022第6-13号)

通信作者: 刘方 E-mail: 327952578@qq.com

interaction, and aligns with four major requirements: ecological civilization, environmental friendliness, safety resilience, and suitability for mountainous areas. Focusing on six ecological dimensions—source, barrier, city, shore, system, and flow—and centering on twelve water-related actions—water conservation and nurturing, water retention and protection, water circulation and management, water maintenance and treatment, water drainage and guidance, and water revitalization and purification, this study establishes a water ecological security evaluation system for mountainous cities' territorial space, characterized by “three levels, four attributes, six dimensions, and twelve actions”. Through empirical research on typical mountainous cities, it proposes that “soil and water” serve as a crucial barrier for maintaining water ecological security in mountainous areas, “water and city” represent a critical link constraining water ecological security, and “water systems” constitute the lifeline for sustaining water ecological security. It emphasizes the need for hierarchical risk assessment of “soil and water”, “water and city”, and “water systems”, with tailored measures based on local conditions and water-specific strategies.

Keywords: mountain cities; territorial space; water ecological; security evaluation

自1987年世界环境与发展委员会首次提出“生态环境安全”以及1989年国际应用系统分析研究所正式提出“生态安全”概念以来,国内外众多学者先后从生态、环境、气候变化、可持续发展等角度开展水生态安全评价研究,构建了涵盖数学模型、生态模型、景观生态模型和数字地理模型等的水生态安全评价方法体系^[1-6],但是研究视角、范围、尺度相对单一,多学科跨界融合、宏微观协同解译、全要素综合评价的水生态安全评价方法体系尚未形成。山地城市因地形、地貌、气候、水文复杂多变,山、水、城各类空间要素丰富、多样、立体,面临着更多的水生态安全问题,亟须融合水生态、水环境、水安全等学科领域,厘清山、水、城生态耦合关系,基于国土空间多重视角、多元尺度、多重要素,深入开展水生态安全评价研究,科学指导山、水、城高质量融合发展。

1 山地城市水生态安全评价方法构建

山地城市国土空间水生态安全评价是一项复杂的系统工程,既涉及概念界定、内涵深研、外延拓展,又涉及自然资源、生态环境、城乡安全、社会发展等方面,还需要国土空间图文数据分析、论证与支撑。为此,首先基于水生态安全理论内涵、基本准则与目标要求,构建评价方法基础;其次,找到国土空间水生态安全评价切入点,构建评价方法框架;最后,基于评价方法框架开展重点领域关键指标分层解译和量化,形成完善的国土空间水生态安全评价方法体系。

1.1 水生态安全评价方法基础

1.1.1 学科融合基础

山地城市气候立体、地形复杂、环境多变、灾害多样,亟须加强山地学、生态学、环境学、气象学、安全学、城市学等诸多学科的跨界融合,丰富和发展水科学理论方法。据此,基于众多学科领域^[1-19]相关关系,建立跨界融合视角下的山地国土空间水生态安全评价基础。

1.1.2 评价逻辑基础

① 山地国土空间水生态系统基本功能属性

水生态系统具备两大基本属性,即自然属性和社会属性。自然属性主要包括资源功能、循环功能、生态功能,社会属性主要包括利用功能、环境功能和安全保障功能。因此,山地城市水生态安全评价应基于水的自然与社会两大属性,聚焦水生态、水环境、水安全三大基础领域,重点关注水的生态功能、环境功能和安全功能。

② 山地国土空间水生态安全评价逻辑关系

水生态、水环境、水安全是水生态系统最基础、最关键、最主要的影响因素,因此山地城市水生态安全评价基于这三大基础学科领域,在可持续发展思想指导下,融入生态文明、海绵城市、韧性城市规划思维的综合评价,旨在实现生态、环境、安全功能的最优化。

1.2 水生态安全评价方法框架

1.2.1 水生态系统特性

① 水土保持功能重要。山地城市坐落于大

型山区内部或周边,大山大水的自然条件不仅造就了丰富、多样、立体的生态空间,而且水源涵养、水土保持、生物多样性维护功能更为重要。

② 山水城融合度高。山地城市建设空间与山体、绿地、河湖、水系、湿地等生态空间联系紧密,各类空间要素更具流动性、互动性、融合性,气候立体多样、景观丰富多彩、水陆空间更具融合性。

③ 水系连通互动性强。山地城市具有丰富多样的河流、湖泊、沟渠、滩涂、湿地,较大的落差、较快的流速、较大面积的消落区、较大差异的水环境容量,使水系更为丰富、多元、立体,各类水空间和水要素动态关联性更强。

1.2.2 水生态安全影响因素分析

通过对我国典型山地城市(重庆市主城区及下辖万州、黔江、涪陵、丰都、奉节、巫山、巫溪、武隆、彭水、酉阳、攀枝花、乐山、雅安、自贡、泸州、宜宾、贵阳、遵义、张家口、承德、阳泉、本溪、通化、伊春、铜川、阿勒泰、青岛、铜陵、十堰、温州、珠海、肇庆、梧州、桂林)的河湖生态健康综合评价研究^[1-19],进一步证实山地城市河湖生态健康水平与全域生态本底、城市开发建设、水系自身循环关系密切,即:全域重要生态空间占比越大,城市开发建设用地占比越低,水系生态连通功能越好,水生态安全性越高。

1.2.3 水生态安全评价多维视角

山地城市水系统具有更立体、更多样、更独特的生态功能、环境功能、安全保障功能,山水城具有更高的统一性、互动性、协同性。因此,立足山、水、城生态耦合基础,聚焦水生态、水环境、水安全根本需求,以国土空间五级三类规划体系为切入点,从宏观、中观、微观多维视角出发,构建基于“全域-地域-水域”的山地城市国土空间水生态安全逻辑框架。

① 宏观视角即全域视角,全域国土空间具有更高的要素关联性和功能复合性,为全流域提供水源涵养、水土保持、气候调节、生物多样性维护等必要性生态服务。水生态安全评价必须立足全域国土空间的系统性、完整性、动态性,统筹山水林田湖草沙生命共同体,综合评价全域生态环境综合承载能力,在底线强管控和发展紧约束要求下,促进国土空间生态要素、环境要素、安全要素紧密关联,实现全域全要素全生命周期规划引领。

② 中观视角即城市视角,山地城市空间形态与用地布局受制于自然地形与水系统格局,表现出

多样性、立体化、互动性。山地地形、水系格局、城市布局三者相互联系、相互制约、相互作用,进一步影响山水城生态系统。水生态安全评价必须厘清山、水、城、人的有机联系和互动关系,充分考虑人与自然的共同利益、价值和权利,从山水城融合视角深入探讨水生态风险及其关联要素的演化趋势,建立各类空间动态保护机制,尽可能提升山水有机体的活力和多样性,寻求山水城生态耦合最佳路径。

③ 微观视角即水系视角,可拓展到水域及其陆域交界地,是水生态系统的基础组成部分,是人类生存延续的重要根基。作为水生态系统的源泉,水系及滨水空间是极具活力的区域,不仅是重要的生态栖息地,且兼具水源涵养、水土保持、水质净化等基础生态功能,也是人类亲水、近水、乐水之地,更是蓄洪、行泄、排涝的安全通道,需要基于水生态安全现状、问题与需求,构建多元化、多样性、立体化的评价方法。

1.2.4 水生态安全评价框架搭建

山地城市水生态安全评价既要注重生态、环境、安全功能的系统性、层次性、有序性,又要注重山、水、城的多样性、立体性、融合性。针对山地城市典型特征,运用国土空间系统规划思维,以“多学科跨界融合、分层级系统架构”为思路,构建融合生态、环境、安全三大学科,立足水土-水城-水系三大空间层级的国土空间水生态安全评价框架(见图1),以此填补我国山地城市国土空间水生态安全评价体系研究空白,为高质量推进山、水、城融合发展提供基础方法指导和关键技术支撑。

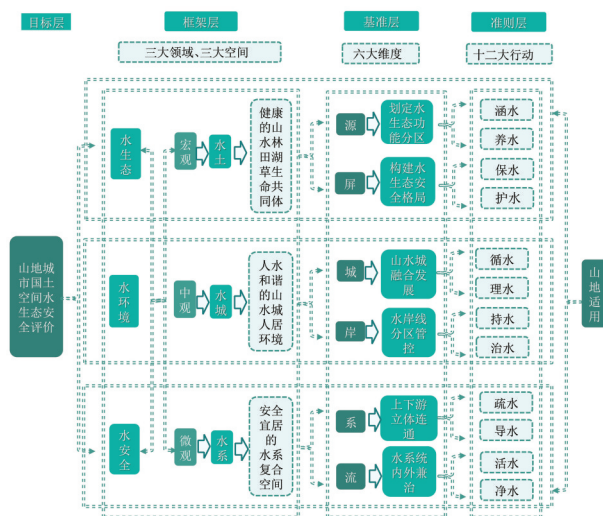


图1 山地城市国土空间水生态安全评价方法总体框架

1.3 水生态安全评价方法体系

1.3.1 构建原则

山地城市国土空间水生态安全评价是水生态系统维护、水环境综合治理、水安全韧性保障的基础,方法构建应遵循以下原则:①科学性原则。通过水生态、水环境、水安全基础领域代表性指标体系评价,完整准确地反映山地水生态安全状况。②可操作性原则。利用现有资料和成果,根据山地水生态系统本底特性、保护需求,选择效率高、成本低、安全可靠的调查和评价方法。③适用性原则。评价方法应具有普适性,并能充分体现山地水生态、水环境、水安全特殊性,评价结果简明直观且数据化、可视化,便于参考和比较。

1.3.2 构建方法

① 评价方法

作为水源涵养、水土保持、生物多样性保护重点区域,山地城市上游责任重大;受制于特殊的自然地形和气候条件,山地城市水生态敏感、水环境脆弱、水安全隐患多,必须深入考察水生态、水环境、水安全各类要素的时空关系,分级、分类、分项开展综合评价。据此,基于国土空间系统规划思维创建了如图2所示的山地城市水生态安全评价方法。

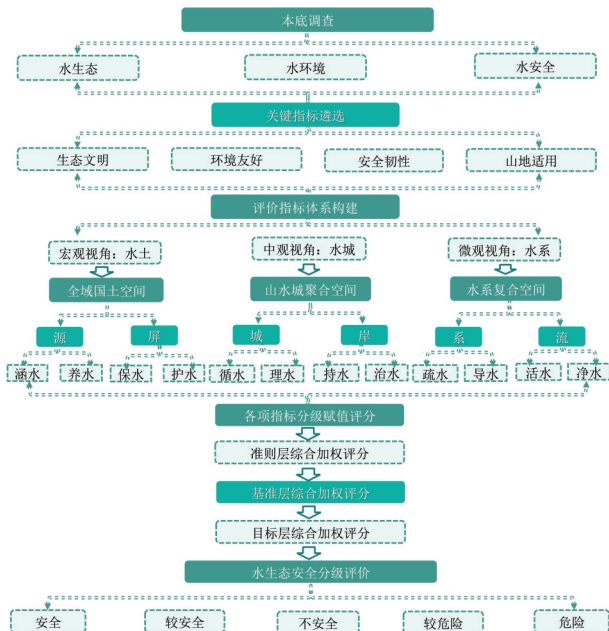


图2 山地城市水生态安全评价方法

首先,基于国土空间宏观、中观、微观视角,厘清山地城市水生态、水环境、水安全之间的内在逻辑,

构建“水土-水城-水系”三级水生态安全评价体系框架;其次,基于山、水、城生态耦合关系,立足水土联控-水城相融-水系联动三大核心功能,锚定生态文明、环境友好、安全韧性、山地适用四大要求,聚焦源-屏-城-岸-系-流六大生态维度,围绕涵水-养水、保水-护水、蓄水-理水、持水-治水、疏水-导水、活水-净水十二大水行动,结合重点领域关键指标筛选、解译和量化赋值,构建“三层级、四特性,六维度、十二行动”的水生态安全评价指标体系;最后,基于各单项指标评价得分与权重,计算准则层、基准层、框架层、目标层的综合评分,分级、分类、分项开展综合评价。

② 计算方法

采用指标分级赋值方法,对目标层、基准层、准则层、指标层逐层加权赋值,系统开展水生态安全评价。

目标层、框架层(基准层、准则层)的水生态安全评价计算方法分别如下:

$$CWEI = \sum_{i=1}^n \mu_i X_i \quad (1)$$

$$CWEI_i = \sum_{j=1}^n \mu_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

式中:CWEI为水生态安全评价价值; X_i 为第*i*级框架层评价价值; μ_i 为第*i*级框架层权重,根据指标层权重计算确定; $CWEI_i$ 为第*i*级框架层(基准层、准则层)评价价值; X_{ij} 为第*i*级框架层(基准层、准则层)第*j*项指标的评价价值; μ_{ij} 为第*i*级框架层(基准层、准则层)第*j*项指标权重,根据指标重要性、适用性、典型性、代表性确定。

根据目标层得分,将水安全划分为5个等级:非常安全($80 \text{分} \leq CWEI \leq 100 \text{分}$)、安全($60 \text{分} \leq CWEI < 80 \text{分}$)、一般($40 \text{分} \leq CWEI < 60 \text{分}$)、不安全($20 \text{分} \leq CWEI < 40 \text{分}$)、危险($0 \text{分} \leq CWEI < 20 \text{分}$)。

1.3.3 评价指标

通过对重点领域指标的梳理、综合指标库的建立以及关键指标的遴选,依据权威性、重要性、代表性、适用性及使用频率,确定水生态安全评价体系的关键指标。

① 指标库搭建

全面收集整理我国相关领域法律法规、标准规范、法定规划、技术文件,检索中国学术期刊网络出版总库CNKI学术文献^[1-19],梳理与水生态安全表征

高度相关的常用指标,通过关键领域重要指标梳理及分析,形成涵盖水生态、水环境、水安全三大基础领域、共236项指标的综合指标库。

② 指标遴选

以实现最优的水生态、水环境、水安全综合功能为目标,确定山地国土空间水生态安全评价指标的遴选要求:a. 与水生态、水环境、水安全三大基础领域高度相关,在生态文明、环境友好、安全韧性方面具有重要的指导意义,可对标对表水生态、水环境、水安全专项规划;b. 具有山地适用性和空间指导性,不仅在国土空间规划中具有明确的定义,而且有助于山地空间的规划管控,受到业内广泛认可,并能与国际接轨;c. 具有可量化性,数据可收集、易获得、可量化,并在一定时间尺度上相对稳

定;d. 具有权威性、重要性和典型代表性,务必能够准确反映山地生态、环境、安全综合特征,而且引用频次较高。

应用加权评分法进行指标遴选,即针对指标的生态文明、环境友好、安全韧性、山地适用四大特性分别评分,加权平均后得分高者入选。遴选计算公式如下:

$$V_i = \sum_{j=1}^m \eta_j Y_{ij} \quad (3)$$

式中: V_i 为第*I*项指标的遴选得分; Y_{ij} 为第*I*项指标的第*J*种性能得分; η_j 为第*J*项性能指向性所占权重。

各项指标遴选评分依据、判断标准和权重如表1所示。

表1 各项指标遴选评分依据、判定标准和权重

项目	水生态指向性评分标准	水环境指向性评分标准	水安全指向性评分标准	山地适用性评分标准
$Y_{ij}=10$ 分	水生态核心指标,出现在国家标准和政策文件中,并有明确规定	水环境核心指标,出现在国家标准和政策文件中,并有明确规定	水安全核心指标,出现在国家标准和政策文件中,并有明确规定	山地国土空间核心指标,出现在国家标准和山地城市地方规划标准中
$Y_{ij}=8$ 分	水生态重要指标,出现在国家标准和政策文件中	水环境安全重要指标,出现在国家标准和政策文件中	水安全重要指标,出现在国家标准和政策文件中	山地国土空间重要指标,出现在国家政策文件或山地城市地方规划标准中
$Y_{ij}=6$ 分	水生态重要指标,出现在地方标准和政策文件中,并有明确规定	水环境重要指标,出现在地方标准和政策文件中,并有明确规定	水安全重要指标,出现在地方标准和政策文件中,并有明确规定	山地国土空间重要指标,出现在地方政策文件或规划标准中,并有明确规定
$Y_{ij}=4$ 分	水生态一般指标,出现在水生态评价指标体系研究和相关专项规划中	水环境一般指标,出现在水环境评价指标体系研究和相关专项规划中	水安全一般指标,出现在水安全风险评价指标体系研究和相关专项规划中	山地国土空间一般指标,出现在山地城市国土空间规划中
$Y_{ij}=2$ 分	水生态一般指标,仅出现在水生态评价指标体系研究中	水环境一般指标,仅出现在水环境评价指标体系研究中	水安全一般指标,仅出现在水安全风险评价指标体系研究中	山地国土空间一般指标,仅出现在山地城市国土空间规划研究中
$Y_{ij}=0$ 分	未在相关领域体现			
权重	0.3	0.2	0.2	0.3

基于以上遴选方法,进行各项指标量化赋值,最终选出加权平均得分不低于8分的指标,作为水生态安全评价体系的关键指标。

1.3.4 评价体系

基于评价体系框架,开展关键指标分层解译、量化赋值、权重判定,构建完善的山地城市水生态安全评价指标体系。根据关键指标定义、内涵、外延和功能属性,基于宏观、中观、微观视角,聚焦“水土-水城-水系”三大基础空间,围绕水土联控、水城

相融、水系联动三大重要功能,锚固源-屏-城-岸-系-流六大生态维度,针对涵水-养水、保水-护水、循水-理水、持水-治水、疏水-导水、活水-净水十二大水行动,进行指标分类、分层、分级解译,明确所属的框架层、基准层、准则层。通过建立指标评判值与标准值的关联,采用等间距插值赋分,确定各项指标赋值评分标准。

根据指标遴选得分值(反映指标的重要性、适用性、典型性、代表性),判定指标的权重,具体见表2。

表2 山地城市水生态安全评价指标体系得分标准及权重

目标层	框架层	基准层	准则层	指标层	100分	80分	60分	40分	20分	0分	指标权重
山地城市水生态安全评价	全域国土空间	源	涵水	生态保护红线面积比/%	30	25	20	15	10	5	0.25
				自然保护地面积占比/%	20	15	10	8	5	3	
		屏	养水	森林覆盖率/%	60	55	50	40	30	20	
			保水	水土流失面积占比/%	20	25	30	35	40	50	
			护水	国土空间开发强度/%	5	10	15	20	25	30	
				水资源开发利用效率/%	10	20	30	40	50	60	
	山水城聚合空间	城	循水	城市绿系连通指数	极顺畅	顺畅	较顺畅	阻隔	严重阻隔	完全阻隔	0.33
				人均城市绿地面积/(m ² /人)	15	12	10	8	5	2	
			理水	污水集中处理率/%	100	95	90	85	75	60	
				排污口布局合理程度/(个/10 km)	0.5	1	2	3	4	5	
		岸	持水	自然岸线保有率/%	90	75	60	40	20	0	
				岸线植被覆盖率/%	90	75	60	40	20	0	
			治水	河湖库岸稳定性	稳定	较稳定	基本稳定	次不稳定	较不稳定	不稳定	
				防洪工程达标率/%	90	85	80	75	70	60	
	水系复合空间	系	疏水	水网密度/(km/km ²)	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.42
				河流纵向连通指数	极顺畅	顺畅	较顺畅	阻隔	严重阻隔	完全阻隔	
				湖泊连通指数	极顺畅	顺畅	较顺畅	阻隔	严重阻隔	完全阻隔	
			导水	水域面积比/%	4	3	2	1	0.5	0	
				湿地保护率/%	100	95	90	85	80	75	
				生态流量满足程度(最小日平均流量与多年平均占比)/%	30	20	15	10	5	0	
				生态水位满足程度/%	日均高于最低生态水位	3日均高于最低生态水位	7日均高于最低生态水位	14日均高于最低生态水位	30日均高于最低生态水位	60日均高于最低生态水位	
				生态水位满足程度/%	日均高于最低生态水位	3日均高于最低生态水位	7日均高于最低生态水位	14日均高于最低生态水位	30日均高于最低生态水位	60日均高于最低生态水位	
			净水	水环境质量	地表水Ⅰ类	地表水Ⅱ类	地表水Ⅲ类	地表水Ⅳ类	地表水Ⅴ类	地表水劣Ⅴ类	
				水功能区达标率/%	100	90	80	70	60	50	
				集中式水源水质达标率/%	100	95	90	85	80	75	
				集中式水源水质达标率/%	100	95	90	85	80	75	

2 水生态安全评价实践探索

以典型山地城市重庆为例展开实证研究。重庆地处我国地势二、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%,是我国重要的水源涵养、水土保持、生物多样性保护区域,也是国家淡水资源战略储备库和重要生物基因库,对构筑我国生态安全屏障至关重要。

2.1 水生态本底调查

2.1.1 数据与处理

① 数据来源

全面收集规划和自然资源系统数据、社会公共

资源共享交换平台数据,来自水利、发改、住建、园林、生态环境等部门的公开数据,以及各类运营商、互联网等公共开放数据,涉及资源、环境、生态、水文、气候、地质、人口、用地、建筑、经济、社会、城乡运行等多个方面。

② 数据处理

统一数据格式,将遥感数据、栅格数据、兴趣点(POI)数据、CAD 数据及其他图文数据统一纳入地理信息系统(GIS)基础数据库,统一采用 2000 国家大地坐标系及高斯-克吕格投影。结合山地特征统一选取 25 m×25 m 的计算精度,统一分辨率。对统计数据、网络抓取数据等按计算需求进行 Z-score 标

准化数据处理,必要时去除数据单位限制,转化为无量纲的纯数值,便于不同单位或量级的指标进行加权和对比。

2.1.2 生态本底调查

通过水源涵养、水土保持、生物多样性维护三大功能集成评价可知,山地城市重庆生态功能重要但空间分布不均,极重要区、重要区、一般重要区面积占比分别为26.03%、48.61%、25.36%。通过水土流失、石漠化敏感性集成评价可知,重庆市生态环境整体极敏感区、较敏感区、一般敏感区面积占比分别为38.47%、37.89%、23.64%。基于生态功能重要性、生态环境敏感性集成评价可知,重庆市生态保护极重要区面积为3.57万km²,占比为43.32%,主要分布于东部盆周山地;重要区面积为3.14万km²,占比为38.11%,主要分布于中部平行岭谷区;一般重要区面积为1.53万km²,占比为18.57%,主要分布于渝西方山丘陵地带。

2022年,重庆国控市控监测河流水库水环境质量总体为优。全市238个监测断面中地表水Ⅰ~Ⅲ类水质断面占95.4%,满足水域功能要求的断面占97.9%。长江干流重庆段总体水质为优,20个监测断面水质均为地表水Ⅱ类。长江支流总体水质为优,122条河流的218个监测断面中,地表水Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类水质断面比例分别为95.0%、4.5%和0.5%。

2.2 水生态安全评价

根据建立的国土空间水生态安全评价方法,基于水土-水城-水系三大基础空间层级,针对源-屏-城-岸-系-流六大生态维度,围绕涵水-养水、保水-护水、循水-理水、持水-治水、疏水-导水、活水-净水十二大水行动,开展山地城市重庆国土空间水生态安全评价。

2.2.1 分级评价

① 水生态安全分级对比

山地城市重庆水生态安全总体属于非常安全等级,2022年CWEI综合得分超过88分。根据三大基础空间、六大生态维度分级评价对比,剖析山地城市国土空间水生态安全的主要问题:“水城”框架层是水生态安全的薄弱环节;“岸”基准层是制约水生态安全的关键短板。山地城市“水土”生态环境本底条件较好、“水系”生态功能健康稳定,但因“水城”开发建设强度大和生态融合度低,尤其是“水

岸”生态修复和空间治理水平滞后,“水城”框架层以及“岸”基准层评价得分最低。因此,促进山水城多元融合、加强水岸线联防联控,是保障山地城市水生态安全的重中之重。

② 水生态安全分级论证

2022年重庆市水生态安全评价体系中单项指标评价结果见图3。

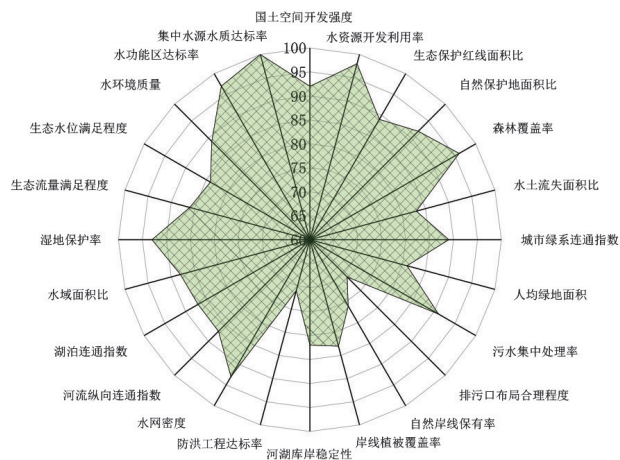


图3 2022年重庆水生态安全评估体系中单项指标评价结果

在“水土”框架层中,“屏”基准层的“水土流失面积比”指标评价得分最低。原因分析:一是地形高差大、地理切割深、切割密度大、地质结构复杂,水生态系统更为敏感脆弱,水源涵养、水土保持难度大,水土流失、石漠化等威胁大。二是不合理的农业生产活动侵占了生态空间,部分区域出现“越薄越垦、越垦越薄”的恶性循环。三是矿产开发活动挤占大量林地、园地、草地、水域等生态空间,不仅造成植被破坏、水土流失、生物多样性退化,还诱发崩塌、滑坡、地面塌陷、泥石流等次生灾害,进一步加剧水土流失程度。

在“水城”框架层中,“岸”基准层的“防洪工程达标率”指标评价得分最低。原因分析:一是降雨分布时空不均,河流坡降大,河道断面狭窄,河水暴涨暴落,汛期洪水流量大、流速快、水量集中,易形成特大洪涝灾害。二是用地条件较差,用地局促,削山造地现象较普遍,而且开发强度更大、建筑密度更高、硬化铺装不透水程度更高,自然水循环受阻,进一步增大防洪排涝难度。三是受城乡开发建设等因素影响,山地城市生境破碎化、片段化现象较为严重,生态廊道连通度低、破坏度高,更易形成

“生态孤岛”,不仅严重影响物种与基因交流,而且进一步阻隔泄洪排涝通道,导致“水城”成为水生态安全最薄弱的环节。

在“水系”框架层中,“系”基准层的“生态水位满足程度”指标评价得分最低。原因分析:一是受限于水文气候条件,山地河流水量水位随季节变化显著,非汛期水位低、流量小,甚至断流;二是水系分布错综复杂,为保障用地开发,自然河道被截弯取直、硬化渠化、加盖成暗河、改造为箱涵等情况更为多见,水循环系统严重受阻;三是高强度、不合理的开发建设行为导致山地水系生境破碎化,汇水通道被阻隔,水系统生态退化,河湖水面缩减,湿地面积萎缩,地表径流减少,生态补水能力受到制约,生态基流难以保障,生态水位满足程度随之降低。

2.2.2 时空评价

① 水生态安全时间对比

1999—2022年重庆水生态安全评价结果如图4所示。

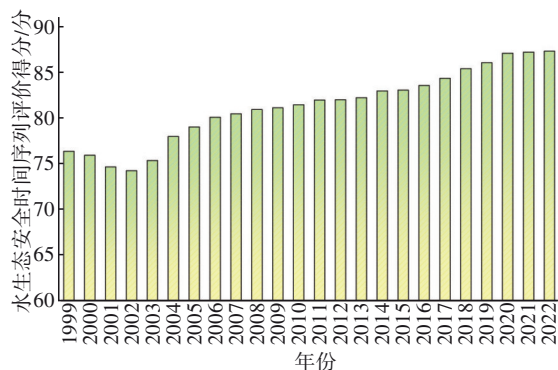


图4 1999—2022年重庆水生态安全时间序列评价得分

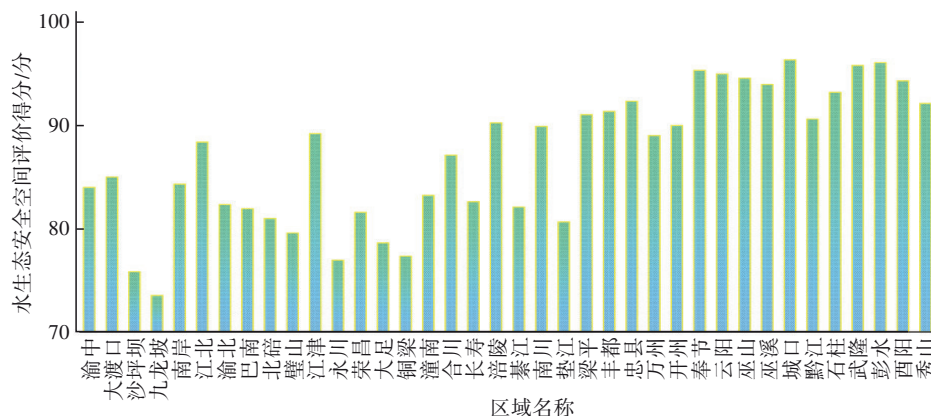


图5 2022年重庆水安全分区评价结果

3 结语

山地城市水土保持难度大、山水城生态安全隐

患多、水系统生境破坏威胁大,“水土、水城、水系”是维系山地城市水生态安全的三大空间基础,水土

② 水生态安全空间对比

2022年重庆市水安全分区评价结果见图5。可以看出,重庆市水生态安全总体呈现从主城都市区向渝东北三峡库区、渝东南武陵山区逐渐提升的态势。中心城区开发强度大、建设密集度高,水生态破坏大、水污染强度高,特别是城市持续扩张且产业高度密集的九龙坡、沙坪坝两区水生态安全等级最低;渝西地区作为城镇化发展主战场,在快速工业化进程中水生态遭受了一定程度的破坏,尤其是大足、铜梁、永川等城市,由于空间治理滞后于城市发展,水生态安全堪忧;渝东北三峡库区、渝东南武陵山区,因当地水资源丰富、过境水资源充沛、水生态本底条件好、生态环境容量巨大,而且城镇开发强度较低、生态环境破坏程度较小,水生态安全等级最高。

联控-水城相融-水系联动是山地城市水生态安全的三大重点内容。应融合生态、环境、安全三大基础学科,厘清山地城市水生态、水环境、水安全之间的逻辑关系,基于国土空间宏观、中观、微观三大视角,从“水土-水城-水系”三大层级构建山地城市国土空间水生态安全评价方法;基于山、水、城生态耦合关系,立足水土联控-水城相融-水系联动三大核心功能,锚固生态文明、环境友好、安全韧性、山地适用四大要求,聚焦源-屏-城-岸-系-流六大生态维度,构建山地城市国土空间“三层级、四特性、六维度、十二行动”的水生态安全评价体系。

典型山地城市国土空间水生态安全评价实证研究表明,“水土”是维护山地水生态安全的重要屏障,“水城”是制约山地水生态安全的关键环节,“水系”是维系山地水生态安全的生命通道,需分层分级判定“水土”“水城”“水系”的潜在风险,因地制宜、因水施策。“水城”框架层尤其是“岸”基准层是影响水生态安全的薄弱环节,亟须加强山水城多元融合、水岸线联防联控。城镇化快速发展的山地缺水地区则是制约水生态安全的典型薄弱区域,亟须加强水生态系统修复、水环境协同管控、水灾害综合防御。

参考文献:

- [1] Balkanlou K R, Müller B, Cord A F, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem services provision in a degraded ecosystem: a systematic assessment in the Lake Urmia basin, Iran[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716:137100.
- [2] 李玉照,刘永,颜小品. 基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6):971-981.
- [3] 陈佳,鲍雅静,徐媛,等. 基于AHP的克孜勒苏河流域生态安全评价及预测[J]. 大连民族大学学报, 2018, 20(3):210-212, 217.
- [4] 张向宁,王小军,齐广平,等. 基于DPSIR-信息敏感性的水安全评价指标体系构建:以庆阳市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9):44-53.
- [5] 侯磊,卢江蓉,梁启斌,等. 基于DPSIR模型的云南省湖泊生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3):485-492.
- [6] 韩会庆,黄娅,张英佳,等. 山地城市景观生态风险与人类活动强度的空间关系分析[J]. 华北水利水电大学学报, 2024, 45(5):38-47, 68.
- [7] 陈泽生,盛志前,钟远岳,等. 山地城市建设用地竖向规划系统优化探索[J]. 城市规划, 2023, 47(7):111-118.
- [8] 蔡懿苒. 国内外生态安全评价研究进展[J]. 安徽林业科技, 2018, 44(5):25-30, 34.
- [9] Meissner R, Steyn M, Moyo E, et al. South African local government perceptions of the state of water security[J]. Environment Science & Policy, 2018, 87:112-127.
- [10] 贡力,逯晔坤,靳春玲,等. 基于改进G1-和谐度方程的兰州市水生态文明评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6):6-11.
- [11] 赵琳琳. 基于TOPSIS的朝阳市水安全评价[J]. 人民珠江, 2019(11):85-88, 116.
- [12] 王先庆,李博,郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019(4):87-93.
- [13] 黄微尘,余朕天,李春晖,等. 基于ELECTRE III的淮河流域水资源安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019(1):20-25.
- [14] 殷鹏飞,王沛跃,赵维岭. 卫河流域防洪体系完善建议思考[J]. 海河水利, 2023(4):48-50.
- [15] 黄强,李沛,冯刚,等. 渭河生态流域评估[J]. 人民黄河, 2022, 44(9):51-55, 88.
- [16] 黄强,邓铭江,畅建霞,等. 构建生态流域理论体系支撑流域生态文明建设[J]. 人民黄河, 2020, 42(9):10-15.
- [17] 彭文启. 河湖健康评估指标、标准与方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5):394-404, 416.
- [18] 高凡,蓝利,黄强. 变化环境下河流健康评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6):81-87.
- [19] 王乙震,郭书英,崔文彦. 海河流域河湖健康评估的实践与发展[J]. 海河水利, 2017(4):7-11.

作者简介:刘亚丽(1974—),女,满族,河北承德人,博士,正高级工程师,注册城乡规划师,研究方向为水资源与水生态规划,获省部级和市局级科技进步奖或优秀城乡规划规划设计奖20项。

E-mail:327952578@qq.com

收稿日期:2023-12-18

修回日期:2024-01-17

(编辑:丁彩娟)