

基于多目标的山地城镇水安全格局综合评价

栾春风, 王颖卓, 赵人镜, 张一

(郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】基于水安全综合评价识别影响水安全问题的关键要素与空间格局, 提高山地城镇制定水安全空间策略的操作性和实施性。【方法】从水资源、水环境、水生态、水灾害规避多目标导向出发, 构建山地城镇综合水安全格局评价指标体系, 采用 GIS 和 RS 空间分析技术, 划分“高、中、低”三种安全水平, 最终将单要素安全格局评价结果进行叠加获取综合水安全格局。【结果】①山地区域的水资源安全水平较高, 城区处于极低安全水平。②水环境安全水平高、中、低区域分别分布在高海拔地区、低海拔地区和平原地区。③水生态安全格局无论是水土保持还是水源涵养格局, 绝大部分地区都处于低与极低安全水平。④水灾害规避安全水平低与极低安全水平的区域虽然占比不高, 但是分布在人口密集的城区及河流水库周边。【结论】在山地城镇中, 山区的综合水安全水平高于平原地区, 而人口密集的城区及其周边属于低安全水平区域, 是水安全治理的关键区域。

关键词:水安全格局; 山地城镇; RUSLE 模型; SCS 模型; 济源市

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

我国山地众多, 山地城镇占全国城镇总数的一半。随着城市化进程的加快, 山地城镇逐渐出现生态环境脆弱、水资源短缺、水质污染、山洪灾害等水安全问题^[1-2]。

水安全格局是指以解决区域水资源、以与水环境和水灾害相关的水安全重要问题为指导, 优化土地资源, 确保优化和调节区域景观格局和实现区域水安全目的空间规划策略^[3]。与纯粹的水安全研究相比, 水安全格局更侧重数据空间化, 通过对研究区所处位置、影响因子及空间联系进行整体分析与判别, 最终以水安全为核心制定未来的空间规划^[4-5]。

目前, 国内外水安全格局研究是基于生态安全格局研究逐步开展的, 研究重点主要在水资源、水环境、水生态、水灾害四个方面。不同学者根据不同学科视角, 将上述要素进行两者或三者整合以此构建水安全格局, 鲜有聚焦四个维度构建的综合水安全格局^[6]。在水资源安全方面, 主要关注水资源的可持续供给问题; 在水环境安全方面, 主要涉及水质安

全、水环境质量评价等; 在水生态安全方面, 主要关注水生态系统的整体稳定性, 包含水源涵养、生态修复、生物多样性等; 在水灾害规避方面, 多与规划类学科相结合, 主要涉及水灾害风险评估、雨洪管理、生态基础设施等内容的^[7]。在研究方法上主要采用压力-状态-响应 (PSR) 模型等多种模型构建水安全的评价指标体系^[8]。在研究范围上, 研究尺度通常较大, 多数集中在对某个区域、流域或是城市的研究, 对于山地城镇的研究较少。

本研究是以河南省南太行山地城镇的典型代表济源市为研究对象, 从水资源、水环境、水生态、水灾害四个角度出发, 建立适合山地城镇水安全格局评价指标体系, 识别关键风险区域, 将影响水安全的要素进行空间可视化, 以期为山地城镇水安全格局的优化与调整提供理论支持, 为我国山地城镇应对水安全危机、促进水系统健康可持续发展提供借鉴。

收稿日期/Received: 2024-12-24

修回日期/Revised: 2025-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(42401355); 河南省科技攻关项目(242102320309、242102320240); 河南省高校人文社会科学研究一般项目(2025-ZZJH-373)。

第一作者:栾春风(1974—), 女, 副教授, 硕导, 博士, 从事城乡生态安全方面的研究。E-mail:luancf@zzu.edu.cn。

通信作者:张一(1990—), 男, 讲师, 硕导, 博士, 从事园林遗产保护方面的研究。E-mail:zhangyi363@zzu.edu.cn。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

济源市位于河南省西北部,是河南省唯一的省辖县级市,总面积 1931 km²,常住人口为 72.7 万人,包含城市化地区的 5 个街道、9 个镇以及邵原

镇、王屋镇两个重点生态功能区。
作为中国地形第二阶梯和第三阶梯的过渡地带,济源市北依太行山、西踞王屋山,主要地貌类型为山地和丘陵,面积占比达到 80%以上(图 1),整体地形起伏大且地表破碎,人类工程扰动频繁。

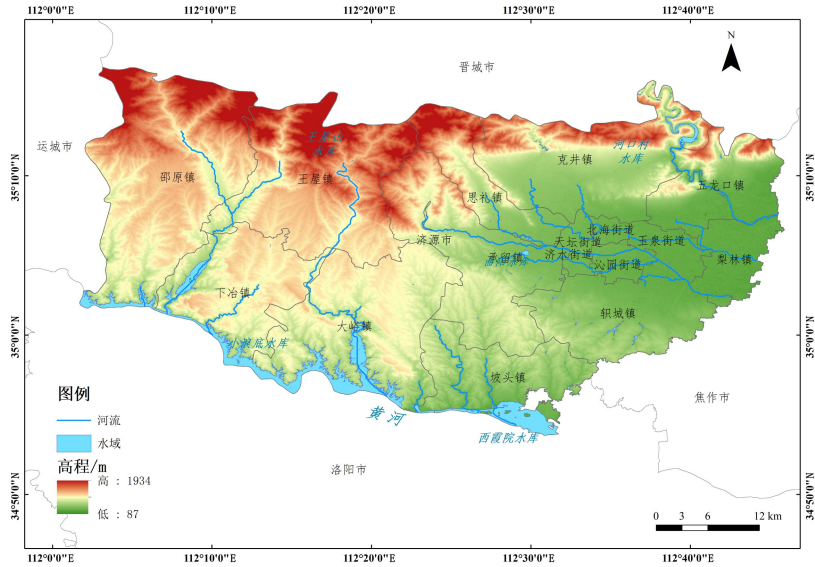


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

基础数据主要包括遥感影像、数字高程模型 (Digital Elevation Model,DEM)数据、土地利用数据、

气象数据、土壤数据等核心数据源及济源市水资源、社会经济等统计数据(表 1)。

表 1 核心数据来源一览表

Tab.1 Summary table of dey data sources

数据类型	数据来源
landsat-8 遥感影像数据	地理空间数据云(2022 年)(https://www.gscloud.cn/search)
DEM 高程数据	地理空间数据云(2022 年)(https://www.gscloud.cn/search)
土壤类型	国家地球系统科学数据中心
土壤信息	世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集的 1:100 万土壤数据
土地利用数据	来源于 Esri,基于 Sentinel-2 卫星遥感图(2022 年)
日降水数据	中国气象科学数据共享网(2022 年)
年降水量	国家地球系统科学数据中心《中国 1 km 分辨率年降水量数据(1982-2022)》
潜在蒸散量	国家青藏高原科学数据中心《中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集(1990-2022)》
水资源统计资料	济源市水资源公报、水环境质量月报、河南省水资源公报(2023 年)等
其他统计资料	济源市人民政府官网、济源市统计年鉴(2023 年)等

2 山地城镇水安全格局评价体系

2.1 山地城镇水安全格局体系构成

水安全是一个多维度的概念,通常包含水资源安全、水生态安全、水环境安全以及水灾害安全防御 4 个方面^[9]。山地城镇因其独特的地形地

貌、气候条件和生态环境,其水安全格局主要通过水量、水质、水活力及水患等要素相互影响,形成了一个严密的体系。其中,代表水量的水资源系统是水安全的基石,直接影响水体的流动性、自净能力及整个系统的健康状态;反映水质的水环境系统则聚焦于水质的维护与提升,以及水生生物多

样性与生态平衡的维持;水生态系统是水活力的体现,通过水土保持与水源涵养促进其他子系统的健康运转;水灾害系统则通过防洪、内涝等水患的防范与应对,保障城市的安全与稳定。

因此,将山地城镇水安全格局构成要素设定为水资源安全格局、水环境安全格局、水生态安全格局和水灾害规避安全格局,这些要素相互影响、相互作用,共同构成了一个完整的水安全格局体系。

2.2 山地城镇水安全格局评价指标体系及权重

由于山地城镇的水生安全状况涉及到许多复杂的因素,本研究采用多视角、全要素视角,深度剖

析水资源、环境、生态及灾害四方面的水安全问题,借鉴国内外前沿研究与数据^[10-11],针对山地城镇特性,筛选并确定各单要素关键评价指标,由此构建山地城镇综合水安全格局评价指标体系。

选择层次分析法作为评价各指标权重的方法,充分考虑山地城镇特有的水生态基底及社会经济多因子影响,科学设定各单要素权重,结合前人的研究成果和专家咨询^[12-13],最终得出各指标权重见表 2。借助 ArcGIS 的栅格计算器,将四大单要素水安全格局进行加权叠加,并运用自然断点法将叠加结果进行分级处理,最终确定研究区“低、中、高”三种安全水平下的综合水安全格局。

表 2 综合水安全格局评价指标体系及权重

Tab.2 Comprehensive evaluation indicator system and weighting scheme for water security patterns						
目标层	准则层	次准则层	指标层	指标影响	权重	
综合水安全格局	水资源安全格局综合指数(0.1750)	水资源量指数	人均水资源量/(m³/人)	正	0.0279	
			多年平均降水量/mm	正	0.0139	
		供水量指数	产水模数/(万 m³/km²)	正	0.0099	
			农林水事务投资/%	正	0.0198	
		水资源利用指数	地下水利用程度/%	负	0.0115	
			水资源开发利用效率/%	负	0.0230	
			人均 GDP/(万元/人)	正	0.0227	
			人均居民生活用水量/L	负	0.0105	
		社会用水压力指数	亩均农业灌溉用水量/m³	负	0.0149	
			万元 GDP 用水量/(m³/万元)	负	0.0036	
			生态环境用水量比例/%	负	0.0069	
			人口密度/(人/km²)	负	0.0041	
		水质情况	城镇化率/%	负	0.0063	
			地表水质	正	0.0821	
			污水管道密度/(km/km²)	正	0.0657	
			合流制管道占比/%	负	0.0656	
		水环境安全格局综合指数(0.2462)	净水能力	水污染防治支出占 GDP 比例/%	正	0.0328
			水生态安全格局综合指数(0.2894)	水土保持能力	土壤保持量/[t/(hm²·年)]	正
	水源涵养能力	水源涵养总量/mm		正	0.1447	
	水灾害规避安全格局综合指数(0.2894)	雨洪灾害危险性	十年一遇雨洪淹没范围/km²	正	0.0965	
			五十年一遇雨洪淹没范围/km²	正	0.0965	
			百年一遇雨洪淹没范围/km²	正	0.0965	

3 研究方法

3.1 水资源安全格局评价

水资源安全格局的评价指标主要选取了水资源量、供水量、水资源利用以及社会用水四大指数,包含 14 个指标因子^[14-15]。

目前,水安全评价指标的划分尚未有统一的标准,本研究以济源市现状水资源本底环境状况和社会经济发展水平为基础,依据国家和国际相关标准和规范要求,并借鉴和参考国内外学者的相关研究成果^[16-17]及咨询相关专家意见,综合评定将水资源安全格局各类评价指标划分为 5 个等级(表 3)。

表3 研究区水资源安全格局评价指标等级划分标准及依据

Tab.3 Classification criteria and rationale for water security pattern evaluation indicators in the study area						
指标	I (极安全)	II (较安全)	III (基本安全)	IV (较不安全)	V (极不安全)	划分依据
人均水资源量/ (m ³ /人)	$x > 2200$	$1700 < x \leq 2200$	$1000 < x \leq 1700$	$500 < x \leq 1000$	$x \leq 500$	我国水行政管理部门 拟定的标准 ^[18]
多年平均降水量 /mm	$x > 2000$	$1500 < x \leq 2000$	$1000 < x \leq 1500$	$500 < x \leq 1000$	$x \leq 500$	相关论文研究 ^[18]
产水模数/ (万 m ³ /km ²)	$x > 120$	$90 < x \leq 120$	$50 < x \leq 90$	$10 < x \leq 50$	$x \leq 10$	相关论文研究 ^[19]
农林水事务投资 /%	$x > 40$	$20 < x \leq 40$	$10 < x \leq 20$	$5 < x \leq 10$	$x \leq 5$	相关论文研究 ^[20]
地下水利用程度 /%	$x \leq 20$	$20 < x \leq 30$	$30 < x \leq 50$	$50 < x \leq 60$	$x > 60$	地下水利用“十二五” 计划规定
水资源开发利用 率/%	$x \leq 10$	$10 < x \leq 20$	$20 < x \leq 30$	$30 < x \leq 40$	$x > 40$	世界各国实践结果
人均 GDP/ (万元/人)	$x > 10$	$7 < x \leq 10$	$4 < x \leq 7$	$1 < x \leq 4$	$x \leq 1$	全国平均水平 ^[21]
人均居民生活用 水量/L	$x \leq 70$	$70 < x \leq 120$	$120 < x \leq 170$	$170 < x \leq 220$	$x > 220$	全国及干旱区城市水 平 ^[18]
亩均农业灌溉用 水量/m ³	$x \leq 300$	$300 < x \leq 420$	$420 < x \leq 500$	$500 < x \leq 600$	$x > 600$	农业灌溉水质标准 ^[18]
万元 GDP 用水量 (m ³ /万元)	$x \leq 250$	$250 < x \leq 500$	$500 < x \leq 1000$	$1000 < x \leq 1500$	$x > 1500$	相关论文研究 ^[22]
生态环境用水量 比例/%	$x > 5$	$3 < x \leq 5$	$2 < x \leq 3$	$1 < x \leq 2$	$x \leq 1$	全国平均水平 ^[17]
人口密度/ (人/km ²)	$x \leq 250$	$250 < x \leq 400$	$400 < x \leq 600$	$600 < x \leq 800$	$x > 800$	全国及中部地区平均 水平 ^[17]
城镇化率/%	$x \leq 25$	$25 < x \leq 45$	$45 < x \leq 65$	$65 < x \leq 85$	$x > 85$	全国平均水平 ^[21]

运用模糊综合评价模型中的三角隶属度函数进行各个指标安全评价得分的计算^[22]。首先要建立评价集,再计算各个指标的相对隶属度,最后根据公式分别计算各个指标的安全得分,公式如下:

$$H_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} T_j \tag{1}$$

式中: H_i 为第*i*个指标的安全评价得分; V_{ij} 为第*i*个指标第*j*个安全等级的相对隶属度; T_j ($T_j=1、2、\cdots、5$)为第*j*个安全等级的赋值,分别代表“极不、较不、基本、较和非常”安全5个等级。

利用 GIS 技术,基于各个评价指标的安全得分,结合指标权重,进行加权叠加,得到各个准则层的安全评价得分空间分析图。最后利用自然间断点分级法,对各个准则层的加权叠加结果进行等级划分,得到不同等级的水资源安全格局分析图。

3.2 水环境安全格局评价

山地城镇水环境问题的主要是生活污水、工业废水等对自然水体造成的污染,其污染程度可由水质情况来反映。水质情况通常需要综合考虑地下水和地表水质综合情况,根据 2023 年济源的环境质量状况公报可知济源市地下水水质状况皆为良好,对于济源市水环境安全的空间格局影响不大,本研究不再引入。

综合污染指数法是确定水质类别的常用方法。

根据济源水环境监测数据,选取 pH、溶解氧、生化需氧量、汞等 21 项污染因子,计算公式如下:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i} \tag{2}$$

式中: P 为断面水质综合污染指数; n 为污染物种类; C_i 为第*i*种污染物平均实测浓度值,mg/L; S_i 为第*i*种污染物浓度的标准值,mg/L。根据水质类别和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),划分研究区水质情况的分级标准(表 4)。

表 4 水质综合污染指数安全分级标准
Tab.4 Safety classification criteria for the comprehensive water pollution index

综合污染指数值 P	水质状况	水安全等级
$P \leq 0.20$	I	极安全
$0.20 < P \leq 0.40$	II	较安全
$0.40 < P \leq 0.60$	III	基本安全
$0.60 < P \leq 0.80$	IV	较不安全
$0.80 < P \leq 1.00$	V	极不安全
$P > 1.00$	劣 V	

基于研究区主要地表水断面年均水质监测数据,融合各断面监测点位图层信息,运用 ArcGIS 构建泰森多边形模型,由此得出济源市水污染综合指数 P 值的空间分布图。

结合国内外学者的相关研究成果^[23],本研究还引入了污水管道密度、合流制管道占比和水污染防治支出占 GDP 的比例等指标,旨在更全面地反映水

环境的安全状况。同时,将水环境安全格局各类评价指标划分为五个等级(表 5)。

表 5 研究区水环境安全格局评价指标等级划分标准及依据

Tab.5 Classification criteria and rationale for water environmental security pattern evaluation indicators in the study area

指标	I (极安全)	II (较安全)	III (基本安全)	IV (较不安全)	V (极不安全)	划分依据
地表水质综合污染指数	$x \leq 0.20$	$0.20 < x \leq 0.40$	$0.40 < x \leq 0.60$	$0.60 < x \leq 0.80$	$x > 0.80$	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)
建成区污水管道密度/(km/km ²)	$x > 7$	$6 < x \leq 7$	$3 < x \leq 5$	$2 < x \leq 3$	$x \leq 2$	相关论文研究 ^[24]
合流制管道占比/%	$x \leq 10$	$10 < x \leq 20$	$20 < x \leq 30$	$30 < x \leq 40$	$x > 40$	相关论文研究 ^[25]
水污染防治支出占 GDP 比例/%	$x > 0.7$	$0.5 < x \leq 0.7$	$0.3 < x \leq 0.5$	$0.1 < x \leq 0.3$	$x \leq 0.1$	相关论文研究 ^[26]

3.3 水生态安全格局评价

结合山地城镇的水生态安全问题,选择水土保持能力和水源涵养能力作为水生态安全格局的评价指标。

3.3.1 水土保持能力分析

采用 RUSLE 模型分析研究区土壤侵蚀情况,由此来表征区域水土保持能力。公式如下:

$$A = RKLCP \quad (3)$$

式中: A 为年平均土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot 年)$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot 年)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot h \cdot mm^2/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L 为地形因子; C 为地表植被覆盖管理因子; P 为水土保持措施因子。

研究过程中主要涉及 3 个主要数据计算,分别为潜在土壤侵蚀量 A_p ,实际土壤侵蚀量 A_r 和土壤保持量 A_c 。公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = RKL(1 - CP) \quad (4)$$

运用 RUSLE 模型的关键在于对各个因子值进行科学有效的确定,这就需要依赖于研究区相关地理要素的详尽分析。研究借助 ArcGIS,收集源数据,确定模型中各个因子的值,依据公式使各个因子叠加分析,计算出研究区的潜在和实际的年平均土壤侵蚀量,并遵循《土壤侵蚀分级标准》(SL190—2007),分别得出两者的土壤侵蚀强度分级图,将两者相减得出研究区土壤保持量分布图,划分不同等级的济源市水土保持格局分析图。

3.3.2 水源涵养能力分析

评估研究区水源涵养能力主要有两个步骤,首先最主要的是运用 InVEST 模型软件中的产水模块估算研究区产水量;二是根据产水量的估算结果来估算研究区的水源涵养量。

产水量模块所需的参数包括降雨量、蒸散量、

土地利用类型、土壤根系深度、植被有效含水量、 $zhang$ 系数、集水区数据、生物物理属性表等。首先统一所有栅格的像元大小及投影坐标系,借助 ArcGIS 平台对数据进行预处理后导入 InVEST 模型,运算得出研究区的产水量结果。

由于研究区属于山地城镇,范围内大多处于山地丘陵区域,需要考虑坡度、海拔等地形因素对研究区水源涵养功能的影响,因此引入地形指数、流速系数和土壤饱和导水率对产水量结果进行修正,从而得出最终的水源涵养量。计算公式如下:

$$W = \min \left(1, \frac{249}{V} \right) \times \min \left(1, \frac{0.9T}{3} \right) \times \min \left(1, \frac{K_s}{300} \right) \times Y_{xj} \quad (5)$$

式中: W 为水源涵养量, mm ; V 为流速系数; T 为地形指数; K_s 为土壤饱和导水率, mm/d ; Y_{xj} 为年产水量, mm 。

基于 InVEST 模型及各个参数值计算得出济源市水源涵养量分布图,依据自然断点法将结果划分四个等级,构建研究区水源涵养安全格局。

3.4 水灾害规避安全格局评价

水灾害规避安全格局的构建借鉴洪水风险图绘制方法,依据不同降雨重现期的洪水淹没范围,设定城市空间管控标准,进而划分多级安全格局,,表征雨洪灾害风险空间分布特征^[27]。

根据山地城镇的雨洪灾害特性及相关水文资料,选取 10 年、50 年和 100 年一遇重现期作为分析指标,利用 Pearson-III 分布曲线计算降水量极值,结合 SCS(Soil Conservation Service)模型计算地表径流,采用基于 DEM 的有源淹没方法模拟不同重现期下的降水量极值所对应的淹没情况,并构建不同安全水平的水灾害规避安全格局,具体技术路线见图 2。

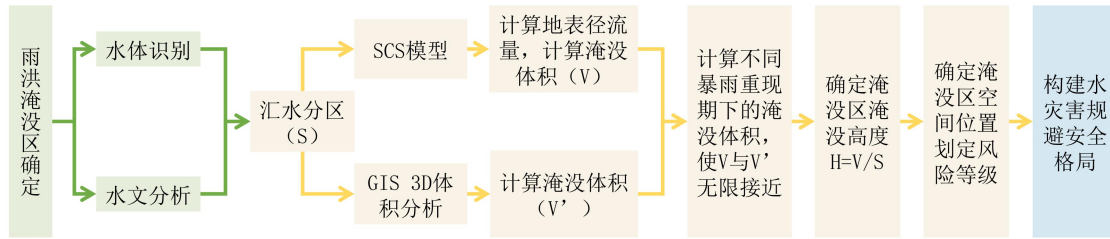


图2 雨洪淹没区范围确定技术路线

Fig.2 Technical approach for delineation of storm flood inundation zones

3.4.1 SCS 模型

SCS 模型可以较好研究在其他因素的作用下雨水径流受到的影响状况,能够用以计算集水区地表雨水径流量^[28]。具体的公式如下:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (6)$$

$$P = I_a + F + Q \quad (7)$$

$$I_a = \lambda S \quad (8)$$

式中, λ 为初损量与集水区最大滞留量的比率,通常取经验值 $\lambda=0.2$ 代入计算。

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S}, P \geq 0.2S \\ Q = 0, \dots, P < 0.2S \end{cases} \quad (9)$$

式中, F 为实际的入渗量,mm; S 为集水区当时可能的最大滞留量,mm; Q 为地表直接径流量,mm; P 为当时的降雨量,mm; I_a 为初始损失值,mm。为了求得 S ,模型引入了一个参数 C_n ,它是与流域内的土地利用方式、土壤湿润度、土壤类型等因素有关的一个综合性参数。表达式为:

$$S = \frac{25400}{C_n} - 254 \quad (10)$$

依据 SCS 模型中 A、B、C、D 四种土壤分类,根据济源市的土壤类型、土地利用类型,结合年降水情况将土壤湿润度等级确定为干旱,参考 C_n 值查算表,结合相关参考文献^[29],确定济源市对应的 C_n 值(表 6)。

表 6 研究区 C_n 值

Tab.6 CN value of the study area

土地利用 类型	C_n 值			
	A	B	C	D
农田	12.3	33.9	49.5	58.4
森林	46.0	59.8	70.4	77.3
灌木	21.2	39.6	54.4	62.7
草原	58.4	70.4	79.1	82.8
水域	51.9	65.7	75.5	79.1
不透水面	100	100	100	100

3.4.2 雨洪灾害危险性分析

运用 Pearson—III 分布曲线计算出济源市 10 年、

50 年和 100 年一遇的降雨量极值分别为 61.34、89.54、102.80 mm^[30]。基于 ArcGIS 水文分析,将济源市细分为 52 个汇水区,结合 SCS 模型,计算各汇水区不同重现期的雨水径流与总水量,并利用 3D 体积分析功能模拟淹没高度,确保无限接近 SCS 模型计算的总水量,从而划定淹没范围。依据暴雨重现频率,将 10 年、50 年、100 年一遇的淹没范围分别界定为极低、低、中安全水平,其余区域视为高安全区,由此构建研究区水灾害规避安全格局。

4 结果与分析

4.1 水资源安全格局

图 3 为济源市水资源安全格局分析图。由图可知,济源市水资源安全格局呈现显著断崖式分异,西部乡镇安全状况明显优于东部。高安全区域广泛覆盖西部,面积占比超半数,而极低安全区域面积最小。济源市中心城区属于水资源安全的极低安全水平,与该区是社会、经济、人口密集地有关,在水资源方面存在着人均水资源量少、用水需求大、降雨量少的问题,成为亟需关注的薄弱区域。

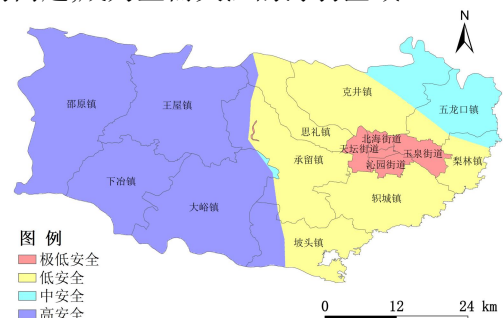


图3 济源市水资源安全格局分析图

Fig.3 Spatial analysis diagram of water resource security framework for Jiyeuan City

4.2 水环境安全格局

图 4 显示了济源市的水环境安全格局。由图可见,济源的水环境安全在空间上呈块状分布,高、中、低安全水平的占比差别不大。就行政区划而言,中心城区及其周边的克井镇、五龙口镇、思礼镇、承留镇、轵城镇的安全等级较低,主要由于这些地区

被工业区,尤其是重工业园区环绕,提高了水污染风险,给水环境带来了巨大的压力。高水平的水环境安全格局主要集中在济源市西北部,这些地区生态条件良好,水环境优越,人类活动干扰较少,保护措施较为完善,水污染风险较低。

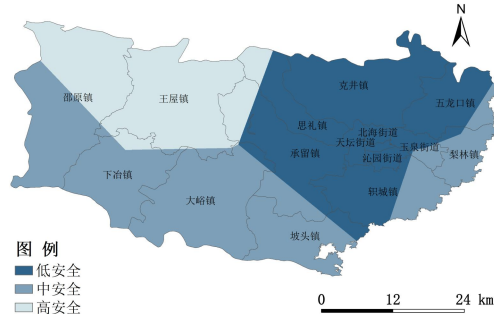


图 4 济源市水环境安全格局

Fig.4 Water environment security pattern of Jiyuan City

4.3 水生态安全格局

通过计算,获得水土保持安全格局和水源涵养安全格局(图 5,图 6)。分析发现,水土保持安全格局中,低与极低安全水平的面积占比超过 90%,水源涵养安全格局中,低与极低安全水平的规模接近 80%,体现了山地城镇在水生态方面的极度脆弱性。

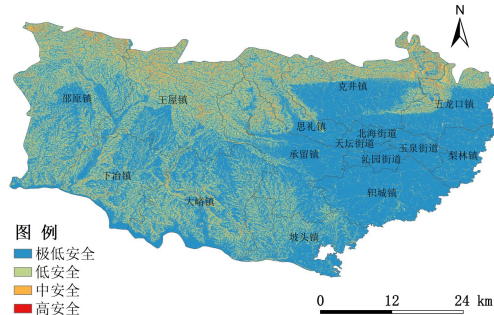


图 5 济源市水土保持安全格局

Fig.5 Soil and water conservation security pattern of Jiyuan City

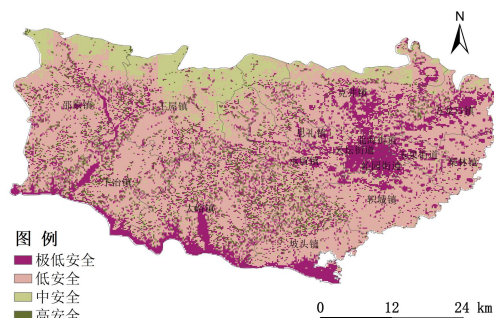


图 6 济源市水源涵养安全格局

Fig.6 Water conservation security pattern of Jiyuan City

将水土保持安全格局和水源涵养安全格局二者加权叠加,并根据自然断点法划分四种等级,最终得出济源市水生态安全格局分析图(图 7)。从空间分布视角来看,济源市水生态安全格局展现出明显

分异。极低安全区集中于南侧河湖带及中心城区街道与乡镇建设用地密集区,其水土保持与水源涵养能力显著低下。高安全区则分布于北部呈现条带状及中部和西部的零星点地带,以高覆盖率森林为标志,区域内陡峭坡势与北部充沛降水结合低蒸散条件,极大增强了土壤保持效果与水源涵养能力。

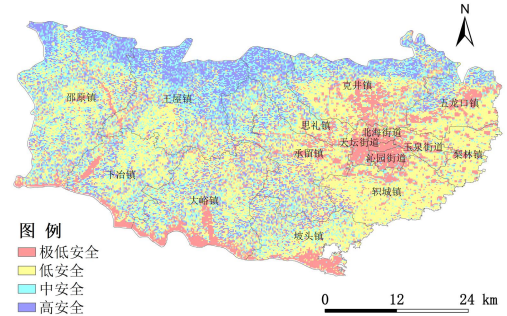


图 7 济源市水生态安全格局

Fig.7 Aquatic ecological security pattern of Jiyuan City

4.4 水灾害规避安全格局

图 8 为济源市的水灾害规避安全格局。由图可知,济源区域内高安全区占据主体,而潜在淹没风险区虽然面积占比较小,但是集中分布在人口密集的市区及河流水库周边。在行政区划上,天坛、北海、沁园街道及轵城、梨林、五龙口等周边区域,处于低安全水平,淹没风险显著。此外,南部坡头、大峪、下冶等镇的部分区域亦面临较高淹没威胁,整体安全水平偏低,需加强防洪减灾措施。



图 8 济源市水灾害规避安全格局

Fig.8 Water hazard avoidance security pattern of Jiyuan City

4.5 综合水安全格局

图 9 展示了济源综合水安全格局,表 7 详细列出了不同安全水平下的面积与占比。分析表明,济源低安全区域占比较小,集中分布于市区及五龙口镇、克井镇、承留镇等市区的周边乡镇。中安全区域大部分位于济源市东部,主要是以农田为主,植被覆盖适中,总体地势不高,具备较强的水土保持能力但水源涵养仍显不足,水灾害风险较低。而高安全区域广泛分布于济源西部的大片区域,地处高海拔、

陡坡区,雨水快速径流,土地覆盖以森林和农田为主,植被茂密,水土保持与水源涵养能力强,水资源丰富且人口密度小,人类活动干扰轻,水生态环境优越,展现出较高的水安全水平。

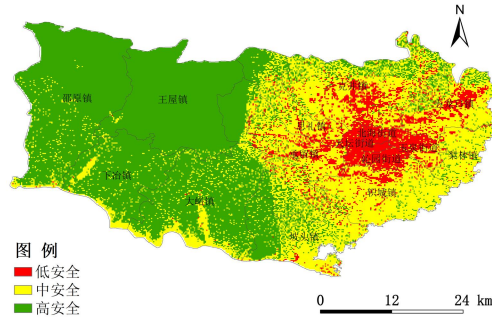


图 9 济源市综合水安全格局

Fig.9 Integrated water security pattern of Jiyuan City

表 7 济源市不同安全水平的综合水安全格局面积及占比

Tab.7 Area and percentage of integrated water security pattern at different security levels in Jiyuan City

安全水平	综合水安全格局面积/km ²	占比/%
低安全	190.99	9.89
中安全	688.41	35.65
高安全	1051.60	54.46

5 结论与讨论

本研究构建了多目标导向下的山地城镇水安全格局综合评价体系,并以济源市为例,通过评价体系分析与识别影响水安全的关键因子及其空间格局,用以制定山地城镇水安全的空间策略。主要结论如下:

1) 山地城镇的水资源安全格局更多的受人为因素影响,例如人均水资源量、水资源开发利用率、人均 GDP、农林水事务投资、亩均农业灌溉用水量等,也因此工业和农业活动强度较大的地区其水资源安全更低。

2) 山地城镇的水环境安全格局主要受到地表水质和净水能力的影响,其中污染源的分布是影响水环境安全格局的关键因素。特别是位于平原的各类产业集聚区域的水环境安全格局通常处于低安全水平。

3) 山地城镇的水生态安全格局无论是水土保持还是水源涵养格局,绝大部分地区都处于极低与低安全水平。

4) 山地城镇的水灾害规避安全格局主要受雨洪淹没范围的影响。其中位于下游平坦地形的人口密集区域及河流水库附近的水灾害规避格局整体水平较低。

5) 从综合的角度来看,山地城镇的不同水平的水安全格局分布状况与地形、土地利用类型、河流等要素存在着较为密切的关系。其中,低安全的水安全格局区域主要分布在中心城区及其周边,是山地城镇水安全的关键风险区域。

由于水安全是一个多因素综合作用的问题,且山地城镇的影响表征呈现多元化,因此,在未来的研究中还应考虑时空分异性,进一步结合多方面要素,进行水安全格局的动态评价与判别。

参考文献

- [1] 卢涛,刘亚丽,刘方,等.山地城市国土空间水生态规划逻辑框架与实践[J].规划师,2024,40(7):112-120.[LU T,LIU Y L,LIU F,et al.Logical framework and practice of water ecological planning for territorial space in mountainous cities[J].Planners,2024,40(7):112-120.]
- [2] 胡澄,渠光华,毛瑞勇.山地城市水安全问题的思考[J].环保科技,2013,19(5):7-10.[HU C,QU G H,MAO R Y. Reflections on water security issues in mountainous cities[J].Environmental Protection and Technology, 2013,19(5):7-10.]
- [3] 李博,甘恬静.基于 ArcGIS 与 GAP 分析的长株潭城市群水安全格局构建[J].水资源保护,2019,35(4):80-88.[LI B, GAN T J.Construction of water security pattern for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on ArcGIS and GAP analysis[J].Water Resources Protection,2019,35(4):80-88.]
- [4] 袁君梦,吴凡.基于 GIS 的秦淮河流域水生态安全格局探讨[J].浙江农业科学,2019,60(12):2291-2294,2356.[YUAN J M,WU F.Discussion on aquatic ecological security pattern in the Qinhuai River Basin based on GIS[J].Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2019, 60(12):2291-2294,2356.]
- [5] 周星宇,郑段雅.武汉城市圈生态安全格局评价研究[J].城市规划,2018,42(12):132-140.[ZHOU X Y,ZHENG D Y. Evaluation research on ecological security pattern of Wuhan urban agglomeration[J].City Planning Review, 2018,42(12):132-140.]
- [6] CUI Q H,LI H C.A bibliometric analysis on the performance and underlying dynamic patterns of water security research[J].Scientometrics,2016,108:1531-1551.
- [7] LI Y,YANG X G.Constructing a water ecological security pattern in sponge cities utilizing machine learning and geographic information systems[J].Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,

2025,25(2):1630-1643.

- [8] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域水安全格局构建:研究进展及概念框架[J].生态学报,2016,36(11):3137-3145.[PENG J,ZHAO H J,LIU Y X,et al.Regional water security pattern construction:Research progress and conceptual framework[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(11):3137-3145.]
- [9] 黎秋杉,卡比力江·吾买尔,小出治.基于水基底识别的水生态安全格局研究:以都江堰市为例[J].地理信息世界,2019,26(6):14-20.[LI Q S,KABILJAN W,KOIDE O. Study on aquatic ecological security pattern based on water base identification:a case study of Dujiangyan City[J].Geomatics World,2019,26(6):14-20.]
- [10] 陈朝,杨贤房,陈进栋,等.综合视角下粤北山区县域水安全格局构建与分析[J].环境工程技术学报,2023,13(5):1931-1940.[CHEN Z,YANG X F,CHEN J D,et al. Construction and analysis of county-level water security pattern in northern Guangdong mountainous area from a comprehensive perspective[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(5):1931-1940.]
- [11] CAI X H,XU D W.Simulation and Optimization Strategy of Storm Flood Safety Pattern Based on SCS-CN Model[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(2):698-698.
- [12] CHEN M,ZHANG S,LIU S,et al.Mapping the groundwater potential zones in mountainous areas of Southern China using GIS,AHP,and fuzzy AHP[J].Scientific Reports,2025,15(1):17159-17159.
- [13] 张玉泽,王爽.黄河流域水资源安全评价及时空格局[J].人民黄河,2023,45(1):25-29.[ZHANG Y Z,WANG S. Water resources security assessment and spatiotemporal pattern in the Yellow River[J].Yellow River,2023,45(1):25-29.]
- [14] 王欣,侯效灵,侯保灯,等.基于 DPSIRM 模型的城市化进程与水安全耦合关系分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):50-57.[WANG X,HOU X L,HOU B D,et al.Analysis of coupling relationship between urbanization and water security based on DPSIRM model[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2021,42(2):50-57.]
- [15] ZHAO M D,WEI J H,HAN Y P,et al.Water resource security evaluation and barrier analysis in Henan Province utilizing the DPSIR framework[J].Frontiers in Environmental Science,2024,12.
- [16] 门宝辉,庞金凤,伍兴涛,等.基于“山水林田湖草”生命共同体理念的北京市水安全评价[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-8[2025-07-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240521.1025.002.html>.[MEN B H,PANG J F,WU X T,et al.Water security evaluation of Beijing based on the concept of "mountains,rivers,forests,farmlands,lakes and grasses" life community[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),1-8 [2025-07-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240521.1025.002.html>.]
- [17] 李艳丽,苏维词,杨吉,等.基于熵权模糊综合模型的重庆市水环境安全评价[J].人民长江,2017,48(9):25-29.[LI Y L,SU W C,YANG J,et al.Water environment security assessment of Chongqing based on entropy-weighted fuzzy comprehensive model[J].Yangtze River,2017,48(9):25-29.]
- [18] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.[LI M M. Research on remote sensing estimation methods of vegetation coverage[D].Beijing:Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications),2003.]
- [19] 孙雅茹,董增川,徐瑶,等.基于云模型的城市水安全评价[J].人民黄河,2019,41(8):52-56,67.[SUN Y R,DONG Z C,XU Y,et al.Urban water security assessment based on cloud model[J].Yellow River,2019,41(8):52-56,67.]
- [20] 张有贤,李二强,罗东霞,等.基于 AHP-熵权法的兰州市水环境安全模糊综合评价[J].安全与环境学报,2020,20(2):709-718.[ZHANG Y X,LI E Q,LUO D X,et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water environment security in Lanzhou City based on AHP-entropy weight method[J].Journal of Safety and Environment,2020,20(2):709-718.]
- [21] DONG D,LI Y J.Application of rough set and fuzzy comprehensive evaluation method in water quality assessment[C]//2010 International Conference on Computing,Control and Industrial Engineering.IEEE,2010,2:126-128.
- [22] 樊胜岳,王贺.以公共价值为基础的水环境治理项目绩效评价:以云南省杞麓湖流域为例[J].地域研究与开发,2019,38(4):132-136,152.[FAN S Y,WANG H. Performance evaluation of water environment governance projects based on public value:A case study of Qilu Lake Basin in Yunnan Province[J].Areal Research and

- Development,2019,38(4):132-136,152.]
- [23] 侯彩霞,陈柯成,付汉良.西北地区水安全综合评价及障碍因子分析[J].水利经济,2025,43(2):81-89.[HOU C X, CHEN K C,FU H L.Comprehensive evaluation of water security and analysis of obstacle factors in Northwest China[J].Journal of Economics of Water Resources,2025, 43(2):81-89.]
- [24] 田涛,薛惠锋.城镇化背景下广州市水安全评价研究[J].人民黄河,2019,41(1):51-57.[TIAN T,XUE H F.Research on water security assessment of Guangzhou City under urbanization background[J].Yellow River,2019,41(1):51-57.]
- [25] 陈姚.襄阳城市水安全评价及其生态修复策略研究[D].华中科技大学,2020:41-44.[CHEN Y.Study on urban water security assessment and ecological restoration strategies in Xiangyang [D].Huazhong University of Science and Technology,2020:41-44.]
- [26] 刘传旺,吴建平,任胜伟,等.基于层次分析法与物元分析法的水安全评价[J].水资源保护,2015(5):27-32.[LIU C W,WU J P,REN S W,et al..Water security assessment based on analytic hierarchy process and matter-element analysis[J].Water Resources Protection,2015(5):27-32.]
- [27] FU S,ZHANG G,WANG N,et al.Initial abstraction ratio in the SCS-CN method in the Loess Plateau of China[J].Transactions of the Asabe,2011,54(1):163-169.
- [28] 顾雯,李丽,石晓丹,等.改进的 SCS 模型在黑龙江省中小流域径流模拟中的应用[J].水文,2017,37(3):70-74.[GU W,LI L,SHI X D,et al.Application of modified SCS model for runoff simulation in small and medium watersheds of Heilongjiang Province[J].Journal of China Hydrology,2017,37(3):70-74.]
- [29] 杨玖,代佼,龚兴涛,等.基于多种方法的长江上游小流域水质综合评价[J].中国环境监测,2023,39(增刊 1):19-26.[YANG J,DAI J,GONG X T,et al.Comprehensive water quality assessment of small watersheds in the upper Yangtze River based on multiple methods[J].Environmental Monitoring in China,2023,39(S1):19-26.]
- [30] 杨娟.用 Pearson-III型概率分布推算贵阳降水量的重现期[J].贵州气象,2015,39(4):8-11.[YANG J.Calculation of precipitation return periods in Guiyang using Pearson-III probability distribution[J].Journal of Guizhou Meteorology,2015,39(4):8-11.]

Comprehensive Evaluation of Water Security Patterns in Mountainous Cities and Towns Based on Multi-Objective

LUAN Chunfeng, WANG Yingzhuo, ZHAO Renjing, ZHANG Yi

(School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 This study comprehensively assesses water security patterns in mountainous towns, identifies key influencing elements and critical zones, and improves the operational feasibility of spatial water security management strategies. **【Methods】** A multi-objective framework addressing water resources, water environment, water ecology, and water hazard mitigation was established to develop an integrated evaluation indicator system for water security patterns. Utilizing Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) spatial analysis techniques, areas were classified into high, moderate, and low security levels. Single-element security patterns were subsequently overlaid to derive the comprehensive water security pattern. **【Results】** (1) Mountainous regions exhibit higher water resource security levels, while urban areas are at extremely low security levels. (2) Areas with high, medium, and low water environmental security are distributed in high-altitude, low-altitude, and plain regions, respectively. (3) In terms of water ecological security pattern, whether in soil and water conservation or water source conservation patterns, the vast majority of areas are at low or extremely low security levels. (4) Although areas with low and extremely low water disaster avoidance security levels account for a small proportion, they are distributed in densely populated urban areas and the surrounding areas of rivers and reservoirs. **【Conclusion】** In mountainous towns, the comprehensive water security level in mountainous areas is higher than that in plain areas, while densely populated urban areas and their surrounding areas belong to low security areas and are key areas for water security governance.

Keywords: water security pattern; mountain towns; RUSLE model; SCS model; Jiyuan city