

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.038; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.038.

谢慧君, 曹聪, 范泽英, 等. 重庆“四山”生态环境状况时空特征与障碍因子分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 353-365.

Xie Huijun, Cao Cong, Fan Zeying, et al. Spatial-temporal variation characteristics and obstacle factors of 'Four Mountains' ecological environment in Chongqing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 353-365.

# 重庆“四山”生态环境状况时空特征与障碍因子分析

谢慧君<sup>1</sup>, 曹聪<sup>1,2</sup>, 范泽英<sup>1,2</sup>, 杜清江<sup>3</sup>, 刘智<sup>1,2</sup>, 尹小彤<sup>1</sup>

(1.重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121;

2.重庆市地下水资源利用与环境保护实验室, 重庆 401121;

3.重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘查设计院), 重庆 400700)

**摘要:** [目的]重庆“四山”地区是重庆重点生态功能区,开展重庆“四山”生态环境状况和障碍因子研究,对进一步保护和合理利用四山资源具有重要指导意义。[方法]基于 DEM、土地利用类型、植被覆盖率和地下水水位监测站等数据基础,采用 AHP-PCA 熵权组合模型、空间自相关分析和障碍度模型等方法,分析了重庆四山地区生态环境质量时空变化特征,探讨了不同聚集模式下的生态环境质量变化趋势,量化了各影响因子对四山生态环境质量影响的障碍度。[结果](1) 2014—2021 年重庆四山地区生态环境质量状况较好,整体以改善趋势为主(面积占比 36.24%);局部出现恶化趋势(面积占比 24.20%),主要分布在人类活动频繁的槽谷地带。(2) 研究区不同等级生态环境质量发生转移,生态环境质量极差和优的区域具有一定稳定性,分别有 59.36%和 73.22%的区域未发生变化;生态环境质量差、一般和良的区域流动性相对较大,发生转移的面积占比分别为 63.69%, 54.09%和 43.65%。不同山脉中,明月山生态环境质量稳定性较高,中梁山生态环境质量改善趋势最小,缙云山生态环境质量存在恶化的风险较其他山脉更大。(3) 聚类分析和异常值分析结果显示:四山生态环境质量的高值区域和低值区域具有显著的空间聚集特征( $p < 0.01$ ),高一低模式下生态环境质量面临进一步恶化的可能,低一高模式下,反映出生态环境可能存在潜在受损状态。(4) 重庆四山地区影响生态环境的各因子中地下水水位障碍度最大,其次为植被覆盖率、生物丰度和城镇开发强度;障碍度变化较大的为隧道建设密度、地下水水位和地表水体丰度,其中隧道建设密度障碍度增加,地下水水位和地表水体丰度障碍度降低。[结论]四山地区生态环境状况向好发展,局部生态环境质量较差,隧道建设密度对生态环境的影响增加。

**关键词:** 生态环境质量; 时空变化; 人类活动; 障碍因子; AHP-PCA 熵权

中图分类号: X826; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0353-13

## Spatial-temporal variation characteristics and obstacle factors of 'Four Mountains' ecological environment in Chongqing

Xie Huijun<sup>1</sup>, Cao Cong<sup>1,2</sup>, Fan Zeying<sup>1,2</sup>, Du Qingjiang<sup>3</sup>, Liu Zhi<sup>1,2</sup>, Yin Xiaotong<sup>1</sup>

(1. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China; 2. Key Laboratory of Chongqing Groundwater Resources Utilization and Environmental Protection, Chongqing 401121, China; 3. Hydrogeology & Engineering Team 208, Chongqing Bureau of Geological and Minerals Exploration/Chongqing Reconnaissance and Design Academy of Geological Disasters Prevention and Treatment Engineering, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** [Objective] The 'Four Mountains' area in Chongqing is a key ecological function zone in the city. The aims of this study are to investigate the ecological environment status and obstacle factors in this area, and to present the guiding for further protecting and rationally utilizing the resources of the Four Mountains. [Methods] Based on data such as DEM, land use type, vegetation coverage, and groundwater level monitoring stations, methods such as the AHP-PCA entropy weight model, spatial autocorrelation analysis,

收稿日期: 2024-06-25

修回日期: 2024-07-15

接受日期: 2024-08-03

资助项目: 重庆英才计划“包干制”项目(cstc2024ycjh-bgzxm0179); 重庆市规划和自然资源局资助项目(CQS22C00432)

第一作者: 谢慧君(1995—), 女, 四川资阳人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为资源与环境遥感。E-mail: 1430679555@qq.com

通信作者: 曹聪(1985—), 男, 辽宁锦州人, 正高级工程师, 主要从事生态保护与修复。E-mail: 281381478@qq.com

<http://stbcjy.paperonice.org>

and obstacle degree model were employed to analyze the spatiotemporal variation characteristics of ecological environmental quality in the Four Mountains area of Chongqing. Additionally, the trend of ecological environmental quality changes under different aggregation modes was explored, and the obstacle degree of each influencing factor on the ecological environmental quality of the Four Mountains was quantified. [Results] (1) From 2014 to 2021, the ecological environment quality of the Four Mountains area in Chongqing was relatively good, with an overall improving trend (accounting for 36.24% of the area). A localized deteriorating trend (accounting for 24.20% of the area) was mainly distributed in the frequently human-active trough areas. (2) There were shifts in ecological environmental quality levels in the study area. The regions with extremely poor and excellent ecological environmental quality exhibited a certain stability, with 59.36% and 73.22% of the areas remaining unchanged, respectively. The mobility of regions with poor, average, and good ecological environmental quality was relatively high, with 63.69%, 54.09%, and 43.65% of the areas undergoing shifts, respectively. Among the different mountains, Mingyue Mountain had higher ecological environmental quality stability, Zhongliang Mountain had the smallest trend of ecological environmental quality improvement, and Jinyun Mountain faced a greater risk of ecological environmental quality deterioration compared to other mountains. (3) Spatial autocorrelation analysis results showed that high and low ecological environmental quality areas in the Four Mountains had significant spatial clustering characteristics ( $p < 0.01$ ). The ecological environmental quality faced the possibility of further deterioration under the high-low pattern, while the low-high pattern reflected a potential state of ecological environment damage. (4) Among the factors affecting the ecological environment in the Four Mountains area of Chongqing, the groundwater level had the greatest obstacle degree, followed by vegetation coverage, biological abundance, and urban development intensity. The obstacle degrees that had undergone significant changes were tunnel construction density, groundwater level, and surface water abundance. Specifically, the obstacle degree of tunnel construction density had increased, while the obstacle degrees of groundwater level and surface water abundance had decreased. [Conclusion] The ecological environment in Four Mountains area is developing well, the local ecological quality is poor, and the influence of tunnel density on the ecological environment is increasing.

**Keywords:** ecological environment quality; temporal and spatial characteristics; human activities; obstacle factors; AHP-PCA entropy weight model

重庆素有“山城”之称,“四山”主要由缙云山、中梁山、铜锣山和明月山四条条状背斜山脉组成,是构成“山城”的地质基础。“四山”地区植被类型丰富,是重庆市重点生态功能区和重要“肺叶”,也是长江上游重要生态屏障中的山体廊道,具有水土保持、涵养水源、净化空气等重要生态作用<sup>[1]</sup>。地下水是生态系统中重要的生态因子,在资源供给和维持生态系统平衡方面发挥重要作用<sup>[2]</sup>。然而,为实现成渝双城经济圈互通互联,“四山”地区在建和已建穿山隧道日益增多,城镇加速扩张,生态环境问题日益显著。隧道工程和城镇建设等人类活动引发如地下水疏干、地表水漏失、地面塌陷、水田旱化、湿地萎缩或消失、地表植被枯萎甚至死亡等一系列地下水相关的生态环境问题<sup>[3]</sup>,给四山地区生态带来严重破坏。因此,为更精准地推进“四山”地区的生态修复工作,迫切需要厘清“四山”地区的生态环境质量时空变化状况,全面掌握

中心城区“四山”生态环境现状,从而为区域进一步生态保护措施的制定和实施提供参考依据。

生态环境质量评价能够反映生态环境的优劣程度<sup>[3]</sup>。目前已有研究采用单一指标或主观层面的生态指数进行评价,如应用归一化植被指数(NDVI)评价植被生长状况<sup>[4]</sup>;使用地表温度(LST)评价城市扩张形状与热岛效应<sup>[5]</sup>;将降水和蒸散指数用于干旱监测<sup>[6]</sup>;利用层次分析法评价生态敏感性等<sup>[7]</sup>方面。然而生态环境是受多因素综合影响,单一生态指数不能全面反映生态系统的整体状况,主观赋权法也存在一定主观随意性。随着生态环境与各个领域日益紧密,为实现生态环境质量状况的全面监测,生态环境质量评价已经从简单的指标评估逐渐演变为综合考虑环境、生态、人口等多方面因素的综合评价模式<sup>[8]</sup>。在这一方面,国内外研究人员开发了许多生态环境质量评价模型和方法,并整合各种评价指标框架,主要包

括:压力-状态-响应(PSR)模型<sup>[9]</sup>、生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(SRP)模型<sup>[10]</sup>和生态压力-生态敏感-生态弹性(PSE)等<sup>[11]</sup>评价模型,模糊层次分析(FAHP)、灰色关联法和层次分析(AHP)-主成分分析(PCA)熵权组合方法等<sup>[12-13]</sup>评价方法,以及将遥感生态指数(RSED)<sup>[8]</sup>、遥感绿色指数(RSGI)等<sup>[14]</sup>应用于生态环境质量评价领域。此外,评价空间维度也不仅限于大区域,而是延伸到矿山、地质环境和大型工程建设等各个层面<sup>[15-17]</sup>。AHP-PCA 熵权组合方法能够综合多种指标因子,有效解决以往评价指标权重主观判断、方法单一等问题,在解决复杂问题及整合主观信息和客观信息等方面具有优势<sup>[18]</sup>。

生态环境质量评价是“四山”地区生态环境保护的基础工作。目前“四山”地区生态修复主要集中在国土绿化面积提升和地质灾害防治等方面<sup>[19]</sup>。但基于研究区众多大长隧道的特点,考虑地下水漏失等因素给生态环境带来影响的研究较少。此外,以往研究多针对点上的现状调查,缺乏基于面状系统资料研究,尚未形成四山区域完整的生态环境质量综合评价指标和体系。本文基于基础地理资料和地下水监测数据,结合遥感等多种资料,采用 AHP-PCA 熵权组合模型方法,综合地表和地下数据,对重庆中心城区“四山”地区生态环境质量进行评价,以期为未来构建稳健有效的生态修复方案和措施提供依据。

## 1 研究区概况

重庆市“四山”位于长江与嘉陵江交汇处,位于 $106^{\circ}20'08''-107^{\circ}3'00''E, 29^{\circ}38'24''-29^{\circ}58'48''N$ ,面积约 $1\,994.48\text{ km}^2$ ,约占重庆中心城区面积的27%。区内地势北高南低,海拔高差 $1\,300\text{ m}$ ,是四川盆地东部平行岭的核心部分,整体为华蓥山系扫帚状褶皱束延伸至重庆境内的支脉(图1)。“四山”纵贯重庆中心城区南北,横跨北碚区、沙坪坝区、九龙坡区、渝中区、大渡口区、江北区、渝北区、南岸区和巴南区等多个区县,研究区内人口具有“小集中、大分散”的特征,分布有中小规模制造业、初级加工业等企业。重庆“四山”地区也是长江上游主要的交通枢纽中心<sup>[20]</sup>。受四条山脉影响,重庆主城区城市空间被划分为多个片区,为加强各个片区的沟通连接和实现成渝经济圈互联互通,必须修建穿越“四山”的各类隧道,目前建设有G75兰海高速、G65包茂高速、G50沪渝高速和G93成渝环线高速等100余条高速公路和铁路隧道(图1),有效促进重庆各区县社会经济的发展。此外,研究区内拥有缙云山国家自然保护区和铜锣山矿山公园等生

态保护与修复典型区,还拥有丰富的地表水资源,包括嘉陵江、后河、御临河和璧南河等多条河流。



图1 研究区地理位置分布

Fig. 1 The geographical location distribution map of the study area

## 2 指标体系及数据来源

### 2.1 评价指标与体系

借鉴国内外生态环境评价相关研究成果,根据研究区生态环境情况和搜集的已有数据资料,综合考虑地下水状况、地表生态环境状况和人类活动情况,遵循客观性、科学性和可操作性原则,构建生态环境质量评价体系。本文选取3个一级指标,包括自然地理因素、地表环境状况因素、人类活动因素;10个二级指标分为起伏度、坡度、水体丰度指数、地下水水位、生物丰度指数、植被覆盖率、土壤侵蚀强度、隧道建设密度、城镇开发强度、人口密度(表1)。

### 2.2 数据来源及预处理

(1) 基础数据:空间分辨率 $30\text{ m}$ 的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于地理空间数据云平台 ASTER GDEM 数据产品(<https://www.gscloud.cn/>),用于计算生成坡度、起伏度和坡长等地形指标因子。气象数据来源于中国气象科学数据网(<https://data.cma.cn/>),选取研究区内及周边共15个站点的日值降雨量数据,统计各站点年累计降雨量,并采用克里金(Kriging)插值法得到降雨

量空间分布栅格数据。土壤侵蚀强度是生态环境质量的重要影响因子,基于降雨数据、地形因子和土地

利用类型等数据,参考修正通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[21]</sup>计算得出。

表 1 重庆“四山”生态环境质量评价指标体系

Table 1 The eco-environmental quality evaluation system of 'Four Mountains' in Chongqing

目标层	一级指标	二级指标	来源	指标属性
生态环境状况	自然地理条件	起伏度	数字高程模型	-
		坡度	数字高程模型	-
		水体丰度	Landsat OLI 影像,公式(2)	+
		地下水水位	地下水水位监测站点	-
		生物丰度	结合土地利用类型经模型计算得出公式(1)	+
	地表环境状况	植被覆盖率	结合 NDVImax 计算得出,公式(3)	+
		土壤侵蚀度强度	采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算得出	-
	人类活动情况	隧道建设密度	重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队	-
		城镇开发强度	建设用地占地面积比率,公式(4)	-
		人口密度	中国科学院资源环境科学数据中心	-

(2) 遥感数据:Landsat OLI 数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)。考虑到云的影响,研究选取 30 m 空间分辨率 2015 年 7 月和 2021 年 8 月成像的 Landsat OLI 影像波段。利用 ENVI5.3 软件进行辐射定标、大气校正、镶嵌和裁剪等预处理过程。

基于遥感影像预处理结果,采用支持向量机监督分类方法将研究区分为耕地、林地、建设用地和水体 4 种土地利用类型。各土地利用类型解译所选取的训练样本分离度均大于 1.8,属于合格样本。土地利用分类结果通过聚类处理对小图斑进行修正,Kappa 系数均大于 94%,满足判别要求。在此基础上,结合天地图影像数据对结果中错分、误分的图斑进行手动修正。

生物丰度指数是表征生态系统活力的指标,能够反映研究区物种的丰富程度。根据土地利用类型解译结果,计算生物丰度指数<sup>[18]</sup>:

$$\text{生物丰度指数} = \frac{(0.35 \times \text{林地} + 0.21 \times \text{草地} + 0.28 \times \text{水域湿地} + 0.11 \times \text{耕地} + 0.04 \times \text{建设用地} + 0.01 \times \text{未利用地})}{\text{区域面积}} \quad (1)$$

水体丰度指数能有效反映地表物体含水量的差异。结合影像预处理结果,计算地表水体丰度<sup>[22]</sup>:

$$\text{SPWI} = \frac{B_5 - B_7 + B_2}{B_5 + B_7 + B_2} \quad (2)$$

式中:SPWI(surface potential water abundance index)为地表水体丰度指数; $B_2$  为蓝色波段(BLUE); $B_5$  为近红外波段(NIR); $B_7$  为短红外波段(SWIR-2)。

年最大归一化植被指数(NDVImax)数据来源于国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>),用于计算植被覆盖度<sup>[23]</sup>:

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (3)$$

式中:FVC(Fractional vegetation cover)为植被覆盖度; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯裸土像元的 NDVI 值,取累计频率 5%处的像元值; $\text{NDVI}_{\text{veg}}$ 为纯植被像元的 NDVI 值,取累计频率 95%处的像元值。

城镇开发强度用于反映城镇建设对地表环境的干扰程度,研究以城镇建设面积占区域面积的比率进行计算:

$$\text{城镇开发强度指数} = \frac{\text{建设用地面积}}{\text{区域面积}} \quad (4)$$

人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

(3) 其他数据:地下水环境监测站点数据和隧道工程资料来源于重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队(<http://www.cqdkj.com/>)。研究中数据空间分辨率统一为 30 m×30 m。

### 3 研究方法

#### 3.1 AHP-PCA 熵权模型方法

3.1.1 指标标准化 本文采用极差法分别对正、负向指标进行标准化处理,计算公式<sup>[18]</sup>为:

正向指标:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

负向指标:

$$X_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中: $X_i$ 为第  $i$  个指标的标准化值; $x_i$ 为指标真实值; $x_{\max}$ 和  $x_{\min}$ 分别为指标  $i$  的最大值和最小值。

3.1.2 AHP 权重 根据研究区实际情况,本文采用层次分析法(AHP)进行生态环境质量评价,该方法具有定性和定量分析结合的特点,适用范围较广。具

体步骤如下<sup>[12]</sup>: (1) 对研究中各指标因素进行分组, 借助1~9标度法对各个评价指标的重要性进行标注, 并进行两两比较, 构建判断矩阵。(2) 分析各因子的权重, 计算判断矩阵的最大特征值和特征向量值。(3) 采用一致性比率CR检验构造出的判断矩阵及权向量的合理性。

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (7)$$

$$CR = CI/RI \quad (8)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; $n$ 为判断矩阵阶数; $CI$ 为判断矩阵一致性检验指标; $RI$ 为判断矩阵平均一致性随机指标。当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有较好的一致性, 其权重计算合理。本研究中 $CR < 0.1$ 。

**3.1.3 主成分权重** 本文采用主成分分析方法(PCA)计算指标权重, 该方法可以消除变量间的相关性, 有效降低数据维度。其权重计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$H_j = \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^2 \quad (j=1, 2, \dots, 10; k=1, 2, \dots, 5) \quad (9)$$

$$w_{2j} = H_j / \sum_{j=1}^m \lambda_{jk}^2 \quad (j=1, 2, \dots, 10) \quad (10)$$

式中: $H_j$ 为各指标公因子方差; $\lambda$ 为载荷系数; $w_{2j}$ 为各指标权重; $k$ 为主成分个数; $j$ 为指标个数。研究借助SPSS 20软件对所选取指标的适用性进行检验。结果显示, 2014年和2021年的Bartlett's卡方值均大于4100( $p < 0.01$ ), KMO(Kaiser Meyer Olkin)均大于0.75, 因此本文所选评价指标适宜做主成分分析。根据主成分分析结果, 选取累计贡献率大于85%的前5个变量作为主要成分。

**3.1.4 最小信息熵组合权重** 利用AHP方法得到的主观权重( $w_{1j}$ )和PCA方法得到的客观权重( $w_{2j}$ ), 根据最小信息熵原理, 综合计算指标权重(表2), 其计算公式<sup>[13]</sup>如下:

$$\min F = \sum_{j=1}^m [w_j \times (\ln w_j - \ln w_{1j})] + \sum_{j=1}^m [w_j \times (\ln w_j - \ln w_{2j})] \quad (11)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (w_j > 0, j=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

根据拉格朗日中值定理可知:

$$w_j = \frac{(w_{1j} \times w_{2j})^{0.5}}{\sum_{j=1}^m (w_{1j} \times w_{2j})^{0.5}} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

式中: $\min F$ 为最小信息熵; $w_j$ 为组合权重; $w_{1j}$ 为主观权重; $w_{2j}$ 为客观权重; $j$ 为第 $j$ 个指标; $m$ 为指标个数。

**3.1.5 综合评价** 研究采用多因子加权叠加模型, 通过各指标因子加权综合, 计算多因素影响作用下四山地区生态环境质量状况。计算公式为<sup>[7]</sup>:

$$EQI = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_i X_i \quad (14)$$

式中:EQI为生态环境质量指数; $a_i$ 为第 $i$ 个指标组合权重; $X_i$ 为第 $i$ 评价指标的标准值。

表2 重庆四山地区生态环境状况指标因子权重

Table 2 The weight of ecological environment status index factors in 'Four Mountains' area of Chongqing

指标	$w_{1j}$	2014年		2021年	
		$w_{2j}$	$w_j$	$w_{2j}$	$w_j$
起伏度	0.0262	0.0054	0.0142	0.0048	0.0135
坡度	0.0421	0.0127	0.0277	0.0115	0.0266
水体丰度	0.108	0.0100	0.0381	0.0054	0.0282
地下水水位	0.1632	0.1941	0.2124	0.1976	0.2166
生物丰度	0.0667	0.1931	0.1354	0.1940	0.1372
植被覆盖率	0.1333	0.1924	0.1911	0.1913	0.1926
土壤侵蚀度强度	0.1333	0.0003	0.0076	0.0003	0.0072
隧道建设密度	0.1667	0.1994	0.2175	0.1999	0.2202
城镇开发强度	0.0883	0.1922	0.1510	0.1951	0.1538
人口密度	0.0883	0.0002	0.0050	0.0001	0.0042

### 3.2 聚类和异常值分析

常用的全局莫兰指数(Global Moran's  $I$ )可衡量区域内的空间自相关程度, 但全局莫兰指数掩盖了局部像素之间的聚类相似区域, 并不能表示冷/热点或空间相关性。采用空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)可解决这一局限, 揭示研究区生态环境质量的聚类区域和冷/热点<sup>[18]</sup>。

### 3.3 障碍度模型

研究利用障碍度模型识别影响重庆“四山”地区生态环境状况的主要障碍因子。计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$P_{ij} = I_{ij} \times w_j / \sum_{j=1}^n (I_{ij} \times w_j) \quad (15)$$

$$I_{ij} = 1 - X_{ij} \quad (16)$$

式中: $P_{ij}$ 为障碍度; $I_{ij}$ 为偏离度; $w_j$ 指标组合权重; $X_i$ 为指标标准化值; $n$ 为指标个数。

## 4 结果与分析

### 4.1 时空变化特征

**4.1.1 空间分布特征** 根据各指标因子加权综合计算结果, 采用自然断点法<sup>[13]</sup>, 结合研究区实际情况将四山生态环境状况分为极差、差、一般、良和优5个等级(图2)。由图2可知, 2014—2021年重庆四山地区整体生态环境质量状况较好, 但在空间分布上存在区域差异(图2A, B)。受四山地区地形因素影响, 生态环境状况呈条状分布特征, 其中生态环境质量极差和差的区域主要分布在人类活动扰动较大的槽谷地带, 主要包括在中梁山长江至嘉陵江之间槽谷和铜锣山

南山街道至一品镇槽谷地区。该区域地势相对平缓,城镇集中,人口密度和建设强度较大,同时该区域岩溶地质条件发育,隧道建设密度较大,易发生地下水漏失等问题,导致该区域生态环境质量相对较差。生态环境质量优和良的区域主要分布在山脊地区,该区域海拔相对较高,人类活动较少,植被覆盖度相对较高,自然环境较好,植被类型以林地为主,生态环境状况较好。生态环境质量一般的区域主要分布在中梁山三圣镇附近和铜锣山统景镇区域,区域内土地利用类型以耕地为主。

由生态环境质量指数分布情况可知(图 2C),

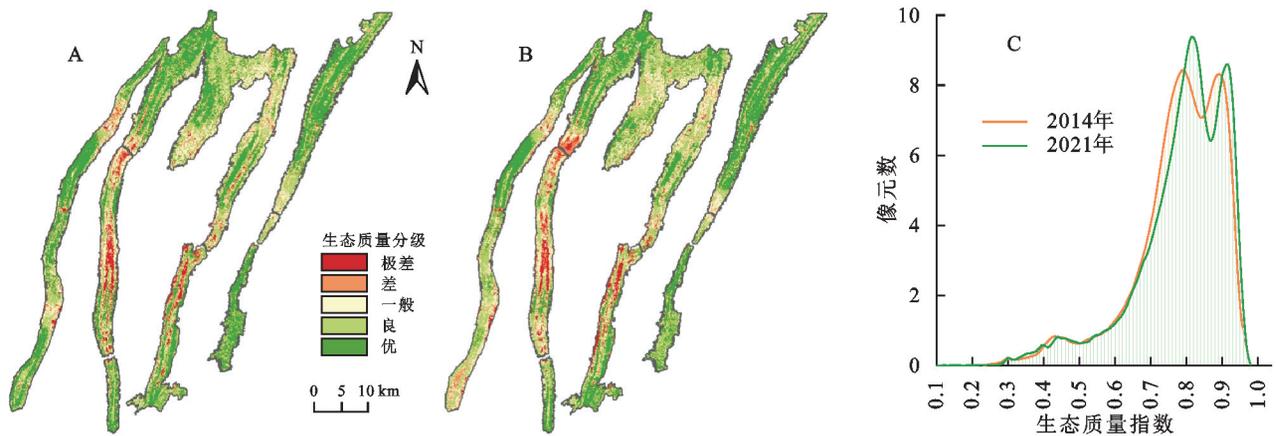


图 2 重庆四山地区 2014 年(A)和 2021 年(B)生态环境质量空间分布及生态环境质量指数分布(C)

Fig. 2 The spatial distribution of eco-environment quality in 2014(A) and 2021(B) and the index distribution of eco-environment quality(C)

表 3 重庆四山地区不同等级生态环境质量面积占比

Table 3 The proportion of different levels of eco-environment quality area in 'Four Mountain' area of Chongqing

年份	面积占比/%				
	极差	差	一般	良	优
2014 年	5.07	8.86	22.38	31.66	32.03
2021 年	5.26	8.89	20.63	34.10	31.13

4.1.2 时空变化特征 研究采用自然断点法将生态环境质量划分为明显恶化、轻微恶化、无明显变化、轻微改善和明显改善 5 种类型,分析 2014—2021 年重庆四山生态环境质量变化状况。结果表明,重庆四山地区生态环境质量整体以改善为主,改善和恶化区域面积占比分别为 36.24%和 24.20%。其中,明显恶化区域面积占比为 3.32%,主要分布在缙云山临峰槽谷地区、中梁山天府镇以及龙州湾街道铜锣山山脚地区;轻微恶化区域面积占比 19.88%,主要分布在缙云山临峰槽谷和中梁山中梁镇等区域;无明显变化区域面积占比 40.56%;轻微改善区域面积占比 30.32%,主要分布在中梁山三圣镇至木耳镇之间、铜锣山一品街道等区域;明显改善区域面积占比 5.92%,主要分布在铜锣山矿山公园和三圣镇附近区

2014—2021 年重庆四山地区生态环境质量指数分布向更大值方向移动,生态环境质量整体向好,但不同程度生态环境质量状况存在结构性差异。2014 年生态环境质量优的区域面积占比最大,为 32.03%,但在 2021 年生态环境质量良的区域面积占比最大,为 34.10%。近 7 年间,生态环境质量极差的区域面积占比增加,生态环境质量一般的区域面积占比减少。总体上,四山生态环境质量较好,整体向好发展,不同等级生态环境质量发生调整,但优和良的区域面积占比均超过 60%,2021 年生态环境质量优和良的区域面积占比大于 2014 年(表 3)。

域(图 3A)。

根据不同等级生态环境质量状况转移情况可知(图 3B,表 4),重庆四山地区的生态环境质量转移具有一定稳定性和流动性,部分区域生态环境质量有所改善,但局部区域呈现出恶化趋势。2014—2021 年生态环境质量极差和优的区域具有一定稳定性,其中生态环境质量优的区域稳定性最高,约 73.22%的区域未发生变化,表明该区域生态环境得到较好的保护和管理;同时极差的生态环境质量区域有较高比例(59.36%)未发生变化,表明该区域生态环境改善面临更大的挑战(图 3B,表 4)。2014—2021 年生态环境质量差、一般和良的区域等级流动性相对较大,生态环境质量发生转移面积占比分别为 63.69%,54.09%和 43.65%,这既表明这些区域对环境治理措施反应较为敏感,也意味着该区域生态环境质量可能更易受外界环境因素影响,应合理采取环境治理措施提高生态环境质量水平。2014—2021 年生态环境质量由一般提升至良和优的区域面积分别占该区域总面积 34.46%和 3.56%,由差提升至良和优的区域面积分别占该区域总面积的 11.79%和 1.31%,显示出该区域生态环境保护 and 治理取得一定成效;此外,生态环境质量由极

差提升至良和优的区域面积分别仅占该区域总面积的2.78%和0.26%,表明生态环境发生剧烈变化的区域相对较少,生态环境质量大幅改善较为困难。此外,部分生态环境表现出恶化趋势,其中生态环境质

量优的区域中有较大比例退化为生态环境质量良的区域(22.99%),生态环境质量良的区域中约17.45%的区域退化为生态环境质量一般的区域,说明该区域生态环境管理需要进一步加强(图3B,表4)。

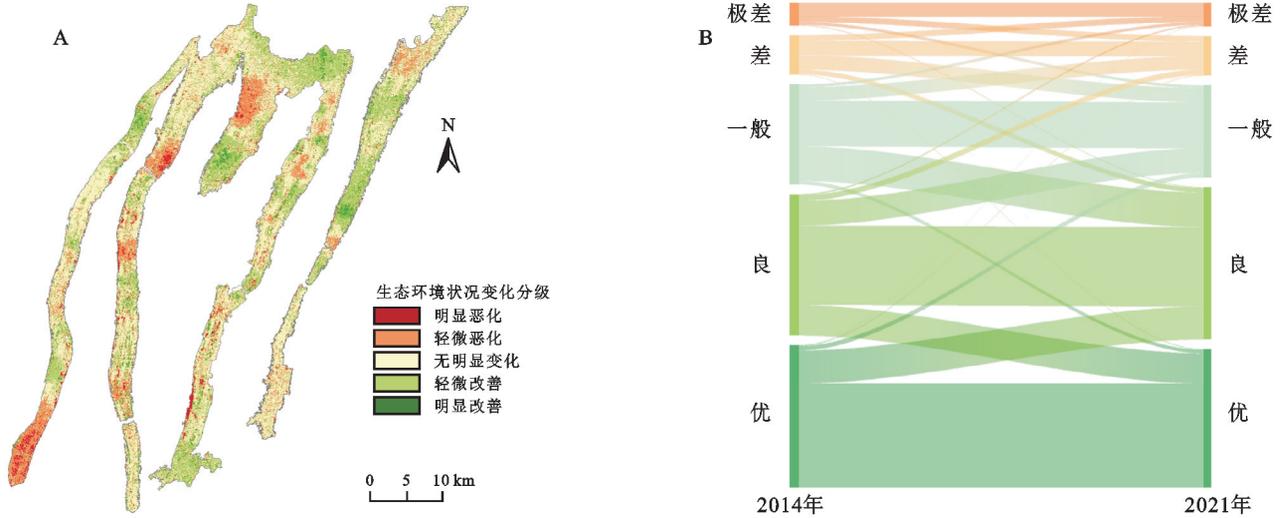


图 3 2014—2021 年重庆四山地区生态环境变化状况 (A) 和不同等级生态环境质量转移方向图 (B)

Fig. 3 The change of eco-environment(A) and the transfer direction of different grades of eco-environment quality(B) from 2014 to 2021

表 4 2014—2021 年重庆四山地区不同等级生态环境质量转移面积占比

Table 4 The proportion of transfer area of different levels of ecological environment quality from 2014 to 2021

2014 年	2021 年				
	极差	差	一般	良	优
极差	59.36	25.51	12.10	2.78	0.26
差	14.69	36.31	35.90	11.79	1.31
一般	2.80	13.27	45.91	34.46	3.56
良	0.87	4.02	17.45	56.35	21.31
优	0.14	0.43	3.22	22.99	73.22

不同等级生态环境质量转移情况表明(表 5),缙云山、中梁山、铜锣山和明月山生态环境质量极差的区域中分别有 52.46%,64.25%,56.9%和 37.86%的区域未发生变化,分别有 28.04%,24.64%,24.97%和 33.71%的区域由极差状态转移到了差的状态,生态环境质量优的区域中分别约 59.72%,68.25%,76.59%和 86.85%的区域保持不变,分别有 33.86%,26.66%,21.01%和 11.99%的区域由优状态转移到了良的状态。

“四山”地区不同等级生态环境质量的转换主要发生在相邻等级之间,主要表现在由差向一般、一般向良方向的转移途径(图 4,表 5)。另外,也有相当一部分生态环境质量向恶化方向转移,主要从优向良、从良向一般、从一般向差方向转移,其中缙云山转移面积最大(图 4A)。四条山脉中,明月山地区生态环境状况最为稳定,改善状态最明显,保持优的区域和

由极差向其他状态转移的面积占比最大(图 4D,表 5)。中梁山地区生态环境质量极差的区域面积占比最大(64.25%),由极差向其他状态转移的区域面积占比最小(35.75%),有较大区域由差状态向极差状态转移(图 4B,表 5),表明中梁山地区生态环境恢复与治理面临较大困难,生态修复难度较大,甚至出现进一步加剧的可能;铜锣山生态环境质量变化状况与中梁山相似,但铜锣山生态环境质量由差向一般状态转移的面积比例和由一般向良状态转移的面积比例更大(图 4C,表 5),生态环境质量改善程度较中梁山更好;缙云山生态环境质量保持优的区域面积占比最小(59.72%),由优向其他状态转移的面积占比最大(40.28%)(表 5),表明缙云山生态环境质量虽然有改善趋势,但同时也面临更大恶化风险。整体而言,重庆四条条状山脉生态环境质量转移情况相对稳定,大幅恶化趋势较低,明月山生态环境质量表现出较高的稳定性,缙云山、中梁山和铜锣山呈现一定改善趋势,但也具有恶化风险,其中缙云山表现最为明显。

4.2 聚类 and 异常值分析

对 2014 年和 2021 年生态环境质量进行聚类和异常值分析,全局莫兰指数均大于 0.7( $p < 0.01$ ),表现出显著空间自相关性。根据空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)结果和生态环境质量变化状况,叠加分析不同类型聚集模式下的生态环境质量变化趋势。结果显示,生态环境质量的高值区域和低值区域均表现出显著的空间聚

集特征( $p < 0.01$ )(图 5A,B)。2014—2021 年生态环境质量高一高聚集模式下无明显变化(48.25%)和轻微改善(36.28%)的区域面积占比较高,对应于生态环境质量较高的区域;低—低聚集模式下无明显变化(30.33%)和轻微恶化(31.80%)的区域面积占比较高,对应于生态环境质量较低的区域(图 5C)。高一低模式下生态环境质量轻微改善和无明显变化的区

域面积占比较高,分别为 35.68%和 33.99%,主要分布在槽谷等人类活动较大的低—低聚集周边,表明该区域生态环境质量面临进一步恶化的可能;低—高模式下生态环境质量轻微恶化和无明显变化的区域面积占比较高,分别为 30.94%和 34.65%,主要分布在高—高聚集等林地区域,在空间上分布较为零散,反映出可能存在潜在受损状态等(图 5)。

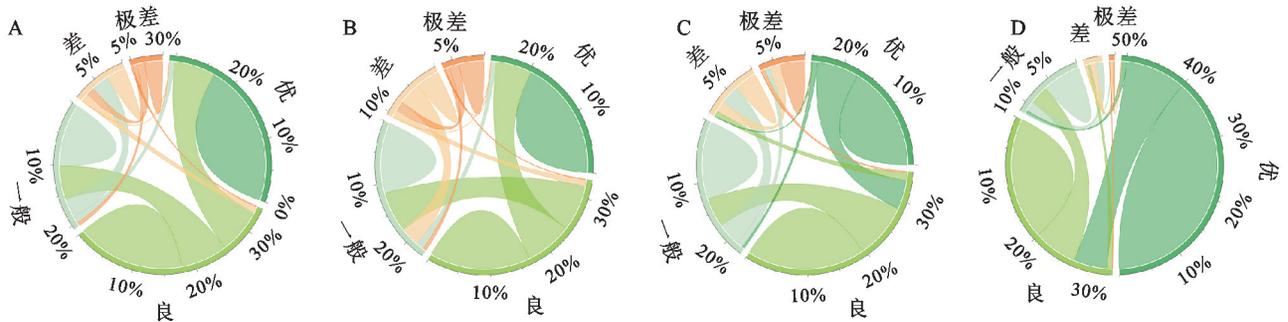


图 4 2014—2021 年重庆缙云山(A)、中梁山(B)、铜锣山(C)和明月山(D)不同等级生态环境质量转移变化比例弦图

Fig. 4 The eco-environment quality transfer changes of different grades in Jinyun Mountain (A),

Zhongliang Mountain (B), Tongluo Mountain (C) and mingyue Mountain (D) in Chongqing from 2014 to 2021

表 5 2014—2021 年重庆“四山”地区不同等级生态环境质量转移面积占比

Table 5 The proportion of different levels of eco-environment quality transfer area in “Four Mountains” area from 2014 to 2021 %

2014 年	2021 年					
	极差	差	一般	良	优	
缙云山	极差	52.46	28.04	16.72	2.63	0.15
	差	11.62	34.03	43.02	10.52	0.81
	一般	2.93	16.22	42.89	34.57	3.39
	良	0.71	9.90	22.12	51.70	15.57
	优	0.11	0.63	5.67	33.86	59.72
中梁山	极差	64.25	24.64	9.04	1.81	0.25
	差	16.43	40.30	31.51	10.40	1.36
	一般	2.74	15.21	47.73	31.16	3.16
	良	0.65	3.75	21.77	54.42	19.40
	优	0.18	0.52	4.38	26.66	68.25
铜锣山	极差	56.90	24.97	14.12	3.72	0.29
	差	16.26	34.95	35.84	11.44	1.52
	一般	3.64	11.56	47.45	33.94	3.42
	良	1.85	2.62	14.65	59.79	21.09
	优	0.23	0.47	1.69	21.01	76.59
明月山	极差	37.86	33.71	20.06	7.95	0.42
	差	7.23	25.45	42.59	23.24	1.49
	一般	1.11	7.63	40.53	45.45	5.28
	良	0.27	1.38	9.12	59.54	29.69
	优	0.04	0.17	0.95	11.99	86.85

### 4.3 障碍因子分析

叠加各指标因子,逐像元提取最大障碍度,得到影响生态环境质量最大障碍度的指标因子在空间的分布状况,结果显示(图 6A,B,表 6),2014 年和 2021 年地下水水位变化是影响四山地区生态环境状况的主要障碍因子,面积占比超过 29.00%,影响范围面积占比减少,主要影响范围包括缙云山临峰槽谷至青木关镇之间、中梁山三圣镇附近和铜锣山玉峰山镇至大湾镇之间等区域,区域地下水水位具有下降趋势;起伏度、人口密度和土壤侵蚀强度变化相对较小,对生态环境质量的影响较小,空间分布上无最大障碍度分布区域。

生物丰度影响范围主要分布在金刀峡镇至茨竹镇之间和铜锣山上段沿山脉两侧区域,面积占比大于 28.00%;植被覆盖率影响范围主要分布在缙云山临峰槽谷、中梁山中梁镇和山洞街道以及铜锣山南山街道至龙州湾街道等区域,面积占比大于 19.00%;隧道建设密度影响范围增大,面积占比从 2014 年 9.56% 增加到 2021 年的 19.02%,影响范围主要分布在中梁山中段的歌乐山镇至龙凤桥街道之间以及铜锣山铁山坪街道至龙州湾街道区域(图 6A,B,表 6),尤其以中梁山最为显著,该区域是主城区通向西部科学城区域的关键交通通道,隧道建设强度较大,隧道建设密度快速增加。

根据障碍度计算结果可知(图 6C),2014—2021 年重庆四山地区生态环境质量影响因子障碍度出现不同程度的变化情况。2014—2021 年,隧道建设

密度、生物丰度、坡度和起伏度对重庆四山地区生态环境质量影响的障碍度增加。其中隧道建设密度增加使得对生态环境质量的障碍度显著加大;生物丰度整体虽然稍有增加,但大部分地区生物丰度轻微降低,在中梁山茨竹镇一大湾镇之间、木耳镇以及明月山南彭街道附近最大障碍度由地下水水位转变为生物丰度,使得生物丰度对区域生态环境质量影响的障碍度有所增加(图 6A,B)。“四山”地下水水位整体下降,但在缙云山嘉陵江以北部分、中梁山木耳镇一天府镇部分、铜锣山龙洲湾街道、一品街道和矿山公园、明月山广阳镇等地区,区域地下

水水位上升,最大障碍度由地下水水位转变为隧道建设密度和生物丰度等因子(图 6A,B),因此地下水水位障碍度有所降低,但依然具有较大的障碍度。地表水体丰度和植被覆盖率增加、城镇开发强度略微降低,这对四山地区生态环境质量影响的障碍度减小。土壤侵蚀强度和人口密度降低,障碍度略有降低,但该指标对四山地区生态环境质量影响的障碍度较小。各影响因子中,地下水水位障碍度最大,其次为植被覆盖率、生物丰度和城镇开发强度。障碍度变化较大的影响因子为隧道建设密度、地下水水位和地表水体丰度(图 6C)。

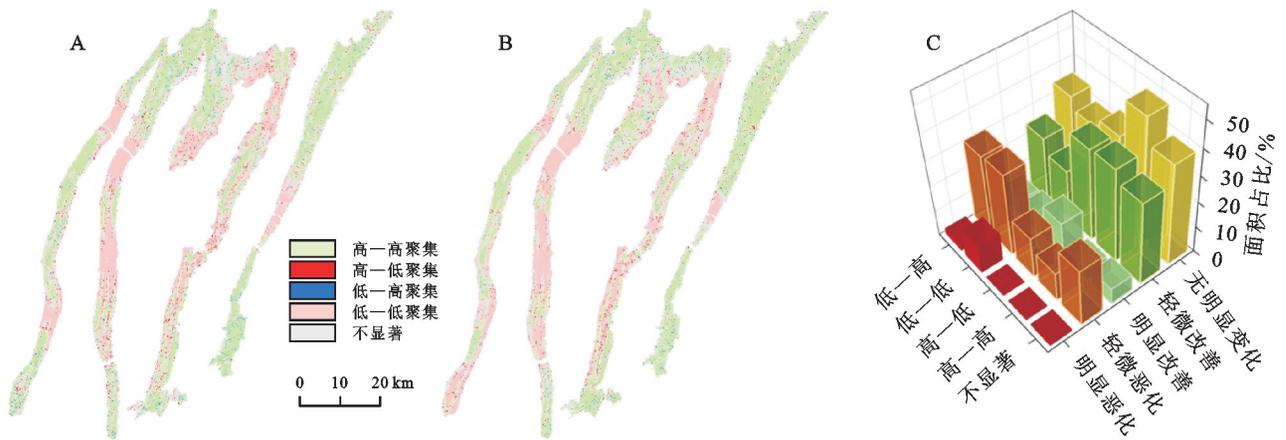


图 5 重庆四山地区 2014 年(A)和 2021 年(B)生态环境质量聚类 and 异常值分析图及变化状况聚类 and 异常值分析(C)  
 Fig. 5 The eco-environment quality clustering and outlier analysis in 2014(A) and 2021(B) and its state of change(C)

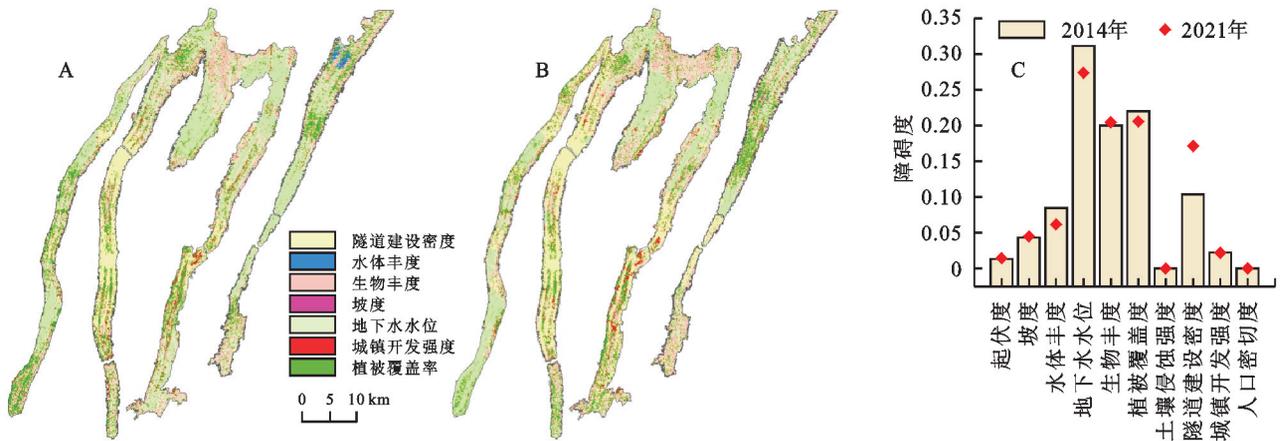


图 6 重庆四山地区 2014 年(A)和 2021 年(B)指标因子最大障碍度空间分布图和指标因子障碍度(C)  
 Fig. 6 The spatial distribution of the maximum obstacle degree of index factors in 2014 (A) and 2021(B) and the obstacle degree of index factors (C)

对比分析重庆 2014 年和 2021 年四条山脉的生态环境质量影响因子障碍度(图 7A,B),结果显示,坡度的障碍度普遍有所增加,特别是在明月山,从 0.056 0 增加到 0.063 6,表明坡度对生态的负面影响在增加;所有山脉的水体丰度上升,水体丰度障碍度都有所下降,其中缙云山水体丰度障碍度变化最为显著,从 0.086 6 降至 0.054 6,对生态环境质量的

负面影响降低;缙云山的地下水水位障碍度,从 2014 年的 0.299 3 增加到 0.323 0,临峰槽谷地区地下水水位明显下降;中梁山、铜锣山和明月山地下水水位障碍度分别从 2014 年的 0.294 5,0.331 5,0.331 1 降低到 2021 年的 0.266 7,0.253 1,0.270 6;缙云山生物丰度障碍度降低,从 2014 年的 0.176 5 降低至 2021 年的 0.159 1,表明该区域生物多样性保护工作取得

一定成效;植被覆盖率障碍度在明月山有所增加,增加了对明月山的生态压力;缙云山、中梁山、铜锣山和明月山的隧道建设密度均有所增加,隧道建设密度障碍度均显著增加,分别从 0.110 8,0.127 9,0.122 6,0.028 3 增加到 0.184 9,0.200 1,0.186 7,0.085 2,中梁山隧道建设密度障碍度最大。这明确指出了近年来基础设施建设对四山生态环境的压力增大,中梁山尤为明显;近 7 年间城镇开发强度障碍度变化不大,铜锣山和明月山的城镇开发强度障碍度增加,中梁山和缙云山城镇开发强度障碍度略微减小(图 7A,B)。整体而言,重庆四条山脉的生态环境质量影响因子障碍度在过去几年中发生了显著变化,特别是隧道建设密度的快速增加,对生态环境产生了较大压力。

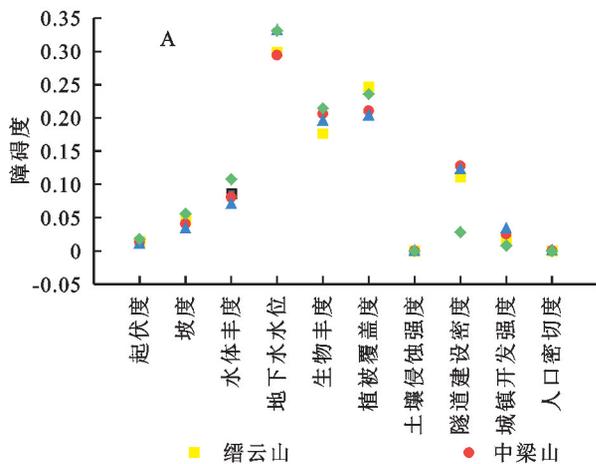


表 6 2014 年和 2021 年重庆四山地区生态环境质量影响因子最大障碍度空间分布面积占比

Table 6 The proportion of the spatial distribution area of the maximum obstacle degree of the eco-environment quality in 2014 and 2021 %

指标因子	2014 年	2021 年
起伏度	—	—
坡度	0.04	0.09
水体丰度	0.35	0.03
地下水水位	38.89	29.54
生物丰度	28.11	29.60
植被覆盖率	21.03	19.62
土壤侵蚀强度	—	—
隧道建设密度	9.56	19.02
城镇开发强度	2.01	2.10
人口密度	—	—

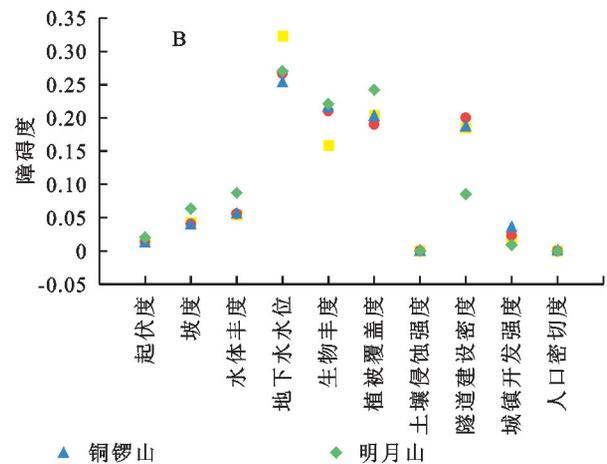


图 7 重庆 2014 年(A)和 2021 年(B)四条山脉生态环境质量影响因子障碍度

Fig. 7 The four mountains eco-environment quality impact factor obstacle degree in 2014(A) and 2021(B)

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

随着四山地区生态环境质量提升和保护措施的实施,四山地区生态环境质量得到改善,生态环境质量差、一般和良的区域等级具有较大流动性,主要向高级质量流动。“十三五”期间,重庆市政府出台《重庆市主城区“四山”保护提升实施方案》《重庆市国土绿化提升行动实施方案》等一系列生态环境保护相关规定和具体实施方案,在“四山”地区系统实施了区域生态系统治理、矿山地质环境综合治理、两江沿线地质灾害防治、水环境保护和综合治理、国土绿化提升、土地整理与土壤污染修复和生物多样性保护等 7 大类工程,涉及退耕还林还草工程和生态系统修复整治工程等 17 项子工程以及 168 个具体项目<sup>[25-26]</sup>。这些方案和项目的实施提升了国土绿化面积,建成了 216 个地下水监测站点,形成了如铜锣山矿山公园等

区域生态系统治理典型区和示范工程,提升了区域生态环境质量,使得生态环境质量得以改善。但部分区域生态环境质量依然保持极差状态,甚至出现退化趋势。这是由于该区域属于典型西南山地岩溶区,生态环境本底较差,地下水环境变化问题突出,地质环境较为脆弱<sup>[20]</sup>,生态环境极易受到人类工程活动破坏,且难以恢复,导致区域生态环境质量的提升面临较大困难。此外,部分生态工程未塑造稳定的生境,生态修复效果难以长久维持、生态修复成效缺乏后期管护和常态化监测,以及生态修复单一,缺乏生态演替和内在机理的研究等问题<sup>[27]</sup>,也是造成生态环境质量未得到提升甚至退化的原因之一。

各影响因子对四山生态环境质量影响的障碍度发生变化。起伏度和坡度的障碍度在 2014—2021 年略有增加,这可能与该区域城市化和水土流失等因素有关。虽然地下水水位整体下降,但地下水水位在部分区域上升,因而地下水水位障碍度降低,表明该区

域地质环境综合治理和水环境修复治理等工程具有一定效果。另一方面,地下水水位障碍度虽然降低,但仍然处于相对较高的水平,这表明地下水水位的下降对生态环境质量有着重要影响。吕玉香等<sup>[28]</sup>研究指出,隧道涌水导致井、泉和地下河疏干,造成水田旱化等严重的生态环境问题。结合实际调查数据发现,截至2021年底,随着隧道建设的增加,研究区已有井、泉衰竭和干枯点299个,塌陷数量超过700处。由于研究区内槽谷区域岩溶发育程度较高,地下水通过岩溶洞缝系统直接与地表水联系<sup>[29]</sup>,而穿山隧道的开挖导致地下水漏失,区域降水补给远小于地下水漏失量,造成水土保持和防风固沙等生态功能降低,对地表生态环境产生较大影响<sup>[28]</sup>。虽然“十三五”期间开展了地下水监测和地质环境综合治理等工作,但并未形成有效的地下水疏排综合治理方案,因此地下水水位障碍度并未出现明显下降。生物丰度和植被覆盖率略微增加,障碍度变化较小,但仍然是关键影响因素。植被覆盖率和生物丰度的保持对于防止水土流失、维护生态平衡至关重要。近年来四山地区积极开展退耕还林、疏林地及未成林地培育等工程,完成退耕还林还草2333.33 hm<sup>2</sup>,营造林任务0.86 hm<sup>2</sup>,使得生物丰度和植被覆盖率得到有效提升和保护。

此外,可能受四山地区多年来积极开展岩溶塌陷治理和拆除“四山”违法违规建筑复绿等生态工程影响<sup>[30]</sup>,土壤侵蚀度强度、人口密度减小,指标因子的障碍度极低,这些因素不是该地区生态环境质量的主要威胁。隧道建设密度的障碍度有所增加,这与近年来重庆地区交通基础设施的快速发展有关,使得基础设施建设对生态环境造成较大压力。其中,中梁山地区生态环境质量极差的区域面积占比和隧道建设密度的障碍度最大。中梁山是“四山”范围内隧道建设最为密集区域,其中以歌乐山镇—中梁镇地区最为突出,在该区段内引发了大量的岩溶地面塌陷,伴随隧道的建成运行和新隧道的规划建设,区域岩溶塌陷仍在持续发生,造成严重的水土流失等问题<sup>[20]</sup>,加之该区域脆弱的地质环境和高密度的城镇建设,使得该区域的生态修复面临巨大挑战。

## 5.2 结论

本文基于2014年和2021年土地利用类型、隧道建设数据、地下水监测数据和DEM等资料,利用AHP-PCA熵权组合模型和空间自相关分析等方法,分析了重庆四山地区生态环境质量空间分布和变化特征,探讨了不同聚集模式下的生态环境质量变化趋

势,并对影响生态环境质量变化的主要障碍因子进行了空间分区。得出以下结论:

(1) 2014—2021年重庆四山地区生态环境质量状况较好,整体以改善趋势为主,改善和恶化区域面积占比分别为36.24%和24.20%。在空间分布上,受地形因素影响,生态环境状况呈条状分布特征,其中生态环境质量极差和差的区域主要分布在人类活动扰动较大的槽谷地带。

(2) 不同等级生态环境质量发生转移,具有一定稳定性和流动性特征。态环境质量极差和优的区域具有一定稳定性,分别约59.36%和73.22%的区域未发生变化;生态环境质量差、一般和良的区域等级流动性相对较大,发生转移面积占比分别为63.69%,54.09%和43.65%。明月山生态环境质量稳定性较高,保持优的区域面积占比86.85%;中梁山改善状态最小,由极差向其他状态转移的区域面积占比最小(35.75%);缙云山生态环境质量存在恶化的风险较其他山脉更大,由优向其他状态转移的面积占比最大(40.28%)。

(3) 研究时段内生态环境质量的高值区域和低值区域具有显著的空间聚集特征( $p < 0.01$ )。高一低模式下生态环境质量轻微改善(35.68%)和无明显变化(33.99%)的区域面积占比比较高;低一高模式下生态环境质量轻微恶化(30.94%)和无明显变化(34.65%)的区域面积占比比较高。

(4) 2014—2021年影响生态环境的各因子中,地下水水位障碍度最大,其次为植被覆盖率、生物丰度和城镇开发强度。障碍度变化较大的影响因子为隧道建设密度、地下水水位和地表水体丰度,其中特别是隧道建设密度的快速增加,加大了生态环境压力。

## 参考文献(References):

- [1] 林凤. 基于生态安全格局的村镇空间扩展研究:以重庆市中梁镇为例[D]. 重庆:重庆大学,2020.  
Lin F. Study on spatial expansion of villages and towns based on ecological security pattern: a case study of Zhongliang Town, Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [2] 郭高轩,代垠东,许亮,等.北京市岩溶地下水质量评价及其生态环境效应[J].中国地质,2024,51(4):1266-1279.  
Guo G X, Dai Y D, Xu L, et al. Assessment of karst groundwater quality and its ecological environmental effects in Beijing[J]. Geology in China, 2024, 51(4): 1266-1279.
- [3] 刘栩位,周启刚,周浪,等.基于RSEI的三峡库区重庆段

- 水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J].水土保持研究,2021,28(5):278-286.
- Liu X W, Zhou Q G, Zhou L, et al. RSEI-based dynamic monitoring of ecological quality of the soil and water conservation functional area in the Chongqing section of the three gorges reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):278-286.
- [4] 皇彦,宋海清,胡琦,等.2000—2020 年内蒙古 NDVI 时空动态及其对水热条件的响应[J].水土保持研究,2024,31(4):197-204,213.
- Huang Y, Song H Q, Hu Q, et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to hydrot hermal conditions in Inner Mongolia from 2000 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):197-204,213.
- [5] Wang Y N, Yi G H, Zhou X B, et al. Spatial distribution and influencing factors on urban land surface temperature of twelve megacities in China from 2000 to 2017[J]. Ecological Indicators, 2021,125:107533.
- [6] Li J L, Li Y, Yin L, et al. A novel composite drought index combining precipitation, temperature and evapotranspiration used for drought monitoring in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Agricultural Water Management, 2024,291:108626.
- [7] Chen Y, Zhang T B, Zhou X B, et al. Ecological sensitivity and its driving factors in the area along the Sichuan-Tibet Railway[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024,26(8):20189-20208.
- [8] 汪士为,吴伟.近 31 年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J].水土保持研究,2024,31(1):427-439.
- Wang S W, Wu W. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in Jialing River Basin in recent 31 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):427-439.
- [9] Li S J, Liu C L, Ge C Z, et al. Ecosystem health assessment using PSR model and obstacle factor diagnosis for Haizhou Bay, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2024,250:107024.
- [10] 李永化,范强,王雪,等.基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究:以辽宁省朝阳县为例[J].地理科学,2015,35(11):1452-1459.
- Li Y H, Fan Q, Wang X, et al. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRP model: a case study in Chaoyang County[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015,35(11):1452-1459.
- [11] 孙平军,修春亮,王忠芝.基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究:以辽宁阜新为例[J].经济地理,2010,30(8):1354-1359.
- Sun P J, Xiu C L, Wang Z Z. Assessment of mining-city's ecological-fragility on changes based on the pse mode[J]. Economic Geography, 2010,30(8):1354-1359.
- [12] 姚昆,周兵,李小菊,等.基于 AHP-PCA 熵权模型的大渡河流域中上游地区生态环境脆弱性评价[J].水土保持研究,2019,26(5):265-271.
- Yao K, Zhou B, Li X X, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability in the Upper-Middle reaches of Dadu River Basin based on AHP-PCA entropy weight model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(5):265-271.
- [13] 邹桃红,常雅轩,陈鹏,等.基于 AHP-PCA 熵权组合模型的吉林省生态环境脆弱性动态评价[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(9):1511-1524.
- Zou T H, Chang Y X, Chen P, et al. Evaluation of eco-environmental vulnerability in Jilin Province based on an AHP-PCA entropy weight model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(9):1511-1524.
- [14] 彭金艳,王世东,潘金胤.基于遥感绿色指数的矿区生态环境质量评价研究:以义马矿区为例[J].矿业科学学报,2023,8(5):704-713.
- Peng J Y, Wang S D, Pan J Y. Study on ecological quality evaluation of mining area based on remote sensing green index: taking Yima mining area as an example[J]. Journal of mining Science and Technology, 2023,8(5):704-713.
- [15] Meng D T, Bao N S, Tayier K, et al. A remote sensing based index for assessing long-term ecological impact in arid mined land[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2024,22:100364.
- [16] 王奎峰,李娜.基于 AHP 和 GIS 耦合模型的山东半岛地质环境承载力评价[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S1):224-227.
- Wang K F, Li N. Evaluation of geo-environmental carrying capacity in Shandong Peninsula based on AHP and GIS coupling model[J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(S1):224-227.
- [17] 杨德虎,孟丹,李雨露,等.大型工程建设前后周边地区生态质量遥感评估:以北京大兴国际机场为例[J].地球科学与环境学报,2022,44(5):839-849.
- Yang D H, Meng D, Li Y L, et al. Remote sensing assessment of ecological quality in the surrounding area before and after the construction of large-scale project: a case study of Beijing Daxing international airport, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,

- 2022,44(5):839-849.
- [18] Guo Y K, Zhao S Q, Zhao X, et al. Evaluation of the spatiotemporal change of ecological quality under the context of urban expansion: a case study of typical urban agglomerations in China[J]. *Remote Sensing*, 2023,16(1):45.
- [19] 王桂林,强壮,曹聪,等.基于地理探测器与层次分析法的岩溶地面塌陷易发性评价:以重庆中梁山地区为例[J].*中国岩溶*,2022,41(1):79-87.
- Wang G L, Qiang Z, Cao C, et al. Evaluation of susceptibility to Karst collapse based on the geodetector and analytic hierarchy method: an example of the Zhongliangshan Area in Chongqing [J]. *Carsologica Sinica*, 2022,41(1):79-87.
- [20] 姜巽,曹聪,刘智,等.歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件[J].*水文地质工程地质*, 2023,50(5):181-191.
- Jiang X, Cao C, Liu Z, et al. Development and formation conditions of Karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023,50(5):181-191.
- [21] 张艳,史飞航,张悦,等.黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J].*水土保持研究*,2023,30(5):1-12.
- Zhang Y, Shi F H, Zhang Y, et al. Temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(5):1-12.
- [22] Jiao Z J, Sun G Y, Zhang A Z, et al. Water benefit-based ecological index for urban ecological environment quality assessments[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021,14:7557-7569.
- [23] 程东亚,李旭东.喀斯特地区植被覆盖度变化及地形与人口效应研究[J].*地球信息科学学报*,2019,21(8):1227-1239.
- Cheng D Y, Li X D. Vegetation coverage change in a Karst Area and effects of terrain and population[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019,21(8):1227-1239.
- [24] 白芳芳,齐学斌,乔冬梅,等.黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J].*水土保持学报*, 2022,36(3):146-152.
- Bai F F, Qi X B, Qiao D M, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization efficiency and obstacle factor diagnoses in nine provinces of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(3):146-152.
- [25] 张仕超,刘竞宇,冉龙池,等.基于提高森林覆盖率目标的跨区县横向生态补偿与供需对接:以重庆市为例[J].*生态学报*,2023,43(11):4651-4663.
- Zhang S C, Liu J Y, Ran L C, et al. Cross-county horizontal ecological compensation and supply-demand docking to increase forest coverage: a case study of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(11):4651-4663.
- [26] 徐川.重庆“四山”地区城乡结合部一三产融合发展模式研究[D].四川绵阳:西南科技大学,2021.
- Xu C. A Study on the integrated development model of primary and tertiary industry in the urban-rural junction of Chongqing's "Four Mountains"[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [27] 郝庆.以流域为单元的山水林田湖草沙一体化保护修复[J].*中国国土资源经济*,2022,35(9):31-36,53.
- Hao Q. Protection and restoration for the integration of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasslands and sands based on watershed[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022,35(9):31-36,53.
- [28] 吕玉香,蒋勇军,王正雄,等.西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展[J].*生态学报*,2020,40(6):1851-1864.
- Lü Y X, Jiang Y J, Wang Z X, et al. Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the Karst valley of Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(6):1851-1864.
- [29] 朱帅,曹建华,杨慧,等.岩溶区植被与岩石地球化学背景间相互作用机制研究进展[J].*岩矿测试*,2023,42(1):59-71.
- Zhu S, Cao J H, Yang H, et al. A review of the interaction mechanism and law between vegetation and rock geochemical background in karst areas[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023,42(1):59-71.
- [30] 李昊宸,刘莉,肖卓棱,等.重庆中梁山矿区生态环境质量时空变化分析[J].*环境科学与技术*,2022,45(S1):220-226.
- Li H C, Liu L, Xiao Z L, et al. Ecological environment quality assessment of Chongqing Zhongliangshan mining area based on remote sensing ecological index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022,45(S1):220-226.