

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.019.

李鑫, 杨朝现, 信桂新, 等. 基于地形梯度的三峡库区景观生态风险特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 156-164.

LI Xin, YANG Chaoxian, XIN Guixin, et al. Landscape Ecological Risk Characteristics of Three Gorges Reservoir Area Based on Terrain Gradient [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 156-164.

# 基于地形梯度的三峡库区景观生态风险特征

李鑫<sup>1</sup>, 杨朝现<sup>1</sup>, 信桂新<sup>2</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 蒋好雨<sup>1</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 长江师范学院, 重庆 408100)

**摘 要:** 景观生态风险评价可以较好地反映外界压力源对生态系统的负面影响, 分析景观生态风险等级在地形梯度上的分布特征, 可为三峡库区生态文明建设和人类活动管控提供科学依据。利用 Landsat (OLI/ETM+) 2000 年、2010 年、2020 年影像数据, 采用 GIS 网格法、克里金插值法构建景观生态风险指数模型, 选取高程、坡度、地形位指数, 基于地形梯度对三峡库区景观生态风险等级特征进行了研究。结果表明: (1) 三峡库区景观生态风险等级分布呈现较强的空间分异特征, 各景观生态风险等级面积呈现动态变化。整个研究期间, 低风险区、中风险区、高风险区面积增加, 较低风险区和较高风险区面积减少。(2) 景观格局发生改变的区域优势分布集中在地形位指数小于 1.24 的区域。景观生态风险等级变化类型以稳定型为主, 其次是前期变化型、后期变化型、反复变化型、持续变化型, 在前期和后期景观生态风险等级转化分别呈现为“较高—高一高”“较高—较高—中”型的转换特征。(3) 景观生态风险等级地形梯度特征表现为库区上游的低风险区向地形位指数大于 0.62 的区域扩散较多, 较低风险区的分布向地形位指数小于 1.03 的区域集中, 库区中下游的较高风险区则主要向高风险区和中风险区转化, 向高风险区转化的区域集中在地形位指数大于 1.03 的区域, 向中风险区转的区域则集中在地形位指数小于 1.03 的区域。整体来看, 三峡库区的景观生态风险值升高, 整体生态环境承受较大压力, 景观格局的改变集中在前期以及地形位指数小于 1.24 的区域。

**关键词:** 景观生态风险; 三峡库区; 地形梯度

**中图分类号:** F301.2; X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)02-0156-09

## Landscape Ecological Risk Characteristics of Three Gorges Reservoir Area Based on Terrain Gradient

LI Xin<sup>1</sup>, YANG Chaoxian<sup>1</sup>, XIN Guixin<sup>2</sup>, YANG Kui<sup>1</sup>, JIANG Haoyu<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University,

Chongqing 400716, China; 2. Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

**Abstract:** Landscape ecological risk assessment can better reflect the negative impact of external stressors on the ecosystem, and analyze the distribution characteristics of landscape ecological risk levels on the terrain gradient, which can provide scientific basis for ecological civilization construction and human activities control in the Three Gorges reservoir area. Based on Landsat (OLI/ETM+) image data in 2000, 2010 and 2020, the landscape ecological risk index model was built by using GIS grid method and Kriging interpolation method, and the characteristics of landscape risk grade in Three Gorges reservoir area were studied by selecting elevation, slope and topographic index. The results show that: (1) the distribution of landscape ecological risk grades in the Three Gorges reservoir area showed strong spatial differentiation characteristics, and the area of each landscape ecological risk grade showed dynamic changes; during the whole study period, the areas with low-risk, medium-risk and high-risk increased, while the areas of lower-risk and higher-risk areas

收稿日期: 2021-12-07

修回日期: 2021-12-30

资助项目: 国家自然科学基金“土地综合整治驱动下乡村要素融合机理与空间重构效应评价”(42171257)

第一作者: 李鑫(1998—), 男, 四川泸州人, 硕士, 研究方向为土地利用规划。E-mail: 2245264387@qq.com

通信作者: 杨朝现(1971—), 男, 四川安岳人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用规划和国土整治研究。E-mail: yangcx@swu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

decreased; (2) the areas where the landscape pattern changed concentrated in areas where the topographic index was less than 1.24; the change type of landscape ecological risk level was mainly stable, followed by early change type, late change type, repeated change type and continuous change type; in the early and late stage, the transformation of landscape ecological risk level was characterized by ‘high-high-high’ and ‘high-high-medium’, respectively; (3) the characteristics of landscape ecological risk grade terrain gradient showed that the low-risk areas in the upper reaches of the reservoir area spread more to areas with topographic index greater than 0.62, and the distribution of low-risk areas concentrated in areas with topographic index greater than 1.03, while the higher-risk areas in the middle and lower reaches of the reservoir area mainly transformed into high-risk areas and medium-risk areas, with the areas transformed into high-risk areas concentrated in areas with topographic index less than 1.03 and those transformed into medium-risk areas concentrated in areas with topographic index less than 1.03. On the whole, the risk value of landscape ecology in the Three Gorges Reservoir area has increased, and the overall ecological environment has been under great pressure. The changes of landscape pattern concentrated in the early stage and the areas with topographic index less than 1.24.

**Keywords:** landscape ecological risk; three gorges area; terrain gradient

生态风险是指一个种群、生态系统或者整个景观的正常功能在外界压力的影响下,生态系统内部的某些要素或者本身的健康力、经济价值、生产力、美学价值和遗传结构减少的可能性<sup>[1]</sup>。区域生态风险评价可以反映自然和人为因素影响下生态过程相互作用的负面影响程度,它是支持生态环境可持续管理的有效工具,对生态风险缓解战略的制定和有限资源的有效配置具有重要的现实意义<sup>[2-4]</sup>。影响区域生态风险的因素可分为人为因素和自然因素,它们具有影响范围较大、作用后果及作用时间难以预测的特点。随着人为因素和自然因素对生态环境的影响不断加剧,生态环境出现了如环境污染、自然灾害频发等问题,生态系统面临的挑战日益严峻<sup>[5-6]</sup>。

在生态风险评价的早期,相关研究多用一种或几种特定的风险源进行评价,如土壤重金属污染评价、农药污染评价、水污染评价等,这些评价方法为环境政策的制定提供了依据,但它们的评价结果单一,缺少对生态风险的综合考量<sup>[7-9]</sup>。基于景观格局指数的生态风险评价以景观脆弱度和景观干扰度为评价指标来构建景观生态风险模型,该方法增加了对景观异质性的关注和空间定量的表征,成为了国内外学者的关注热点之一<sup>[10-11]</sup>。目前基于景观格局的生态风险评价在研究方法上通常将地形因子作为景观脆弱度的损失因素,没有在地形梯度上考虑景观生态风险的分布特征。已有研究表明,地形特征对土地利用格局有显著影响,各土地利用类型在不同的地形梯度呈现出显著的分布差异<sup>[12-13]</sup>,进而造成了景观生态风险在不同地形梯度上的空间差异性。因此,量化地描述不同地形梯度上景观生态风险的空间分布,可揭示出景观生态风险空间特征在地形作用下的变化规律,为

区域生态系统管理提供参考。

三峡库区是一个独特的地理单元(重庆市22个区县和湖北省4个县),是长江上游天然生态保护屏障带<sup>[14-15]</sup>。三峡水电站作为我国迄今为止最大的水利工程,在防洪、发电、航运和灌溉等方面发挥了巨大的社会、经济效益,同时对库区的生态环境、土地利用结构演变有较深远的影响<sup>[16-17]</sup>。目前对三峡库区的生态环境研究主要集中在库区水源污染、库区消落带植被恢复等方面,对整个库区的景观生态风险评价研究较少。基于此,本研究以三峡库区为例,从高程、坡度、地形位指数3个维度定量化刻画其景观生态风险等级的地形梯度特征,以期揭示三峡库区景观生态风险垂直截面的空间异质性规律,为三峡库区生态风险管控策略的制定提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

三峡库区(东经105°50′—111°40′,北纬28°31′—31°44′)位于我国三大阶梯地貌中的第二级阶梯,由大巴山褶皱带、川东平行岭谷和渝鄂湘黔隆起褶皱带三大地质单元构成。整个库区山地面积占74.0%,丘陵占21.7%,平原占4.3%,库区整体地形呈“东北高、西南低”的特征,库区高程值处于0~2 896 m,库区东北部靠大巴山南麓、中部属川东平行岭谷区、西南部抵云贵高原北缘。库区气候属中亚热带湿润季风气候,冬暖夏热,水热资源较丰富,年均降水量1 000~1 400 mm,4—9月为主要的降水季,出现大雨、暴雨的频次较高。库区主要植被类型有落叶阔叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、草丛和农业植被等。

### 1.2 数据来源与处理

研究区土地利用数据来源于美国地质调查局 (<https://www.usgs.gov/>) Landsat (OLI/ETM+) 卫星影像,选取 2000 年、2010 年、2020 年成像时间在 6—9 月平均含云量低于 10% 的影像,在 ENVI5.3 软件的支持下,对图像进行校正及配准等预处理,利用最大似然法进行监督分类,结合研究区实际情况和野外调查,将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。影像数据经过随机抽样检查 kappa 检验精度分别达到 86.77%,86.52%,87.34%,能满足研究分析需要。DEM(30 m×30 m)数据来源于 ASTER GDEM(<http://www.gscloud.cn/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 地形梯度划分

为揭示在地形梯度上景观生态风险指数的空间差异性特征和规律,研究选取了高程、坡度、地形位指数 3 个指数对景观生态风险指数进行定量刻画。地形位指数计算公式如下:

$$T=\lg[(E/\overline{E}+1)\times(S/\overline{S}+1)] \quad (1)$$

式中: $T$  为地形位指数; $E$  为栅格单元中任一栅格单元的高程值; $\overline{E}$  为栅格单元的平均高程值; $S$  为栅格单元中任一栅格单元的坡度值; $\overline{S}$  为栅格单元的平均坡度值。一般情况下,高程值、坡度值越大的栅格单元地形位指数就越大,反之就越小。

地形梯度级别的划分决定了各景观生态风险等级的分布指数。目前对地形指数的分级方法有分位数法、自然断点法、等距离法等。已有的研究表明,地形对土地利用结构与分布有显著影响,土地本身就是地表景观的宏观表征方式,其组成结构和格局变化与景观生态风险的时空分布和动态高度关联。因此,参考相关学者在地形因素对土地利用格局的影响上<sup>[18-20]</sup>的研究成果,综合考虑三峡库区的现状对地形指数进行分级,将坡度、高程、地形位指数划分为 8 级,各级指数的区间见表 1。

表 1 地形梯度级别划分

地形梯度 级别	高程/m	坡度/(°)	地形位 指数
1	<200	0~2	<0.21
2	200~400	2~6	0.21~0.41
3	400~600	6~10	0.41~0.62
4	600~800	10~15	0.62~0.82
5	800~1000	15~20	0.82~1.03
6	1000~1200	20~25	1.03~1.24
7	1200~1800	25~30	1.24~1.85
8	>1800	>30	1.85>

为消除不同地形位区段间和不同景观生态风险等级间因面积差异大带来的量纲影响,不同景观生态风险等级在各级地形梯度上的变化可选取分布指数进行描述,其计算公式如下:

$$P=\frac{S_{ie}}{S_i}/\frac{S_e}{S} \quad (2)$$

式中: $P$  为分布指数; $S_{ie}$  为在第  $i$  类景观生态风险等级在第  $e$  类地形梯度区间下的分布面积; $S_i$  为第  $i$  类景观生态风险等级的面积; $S_e$  为第  $e$  类地形梯度区间的面积; $S$  为研究区总面积。当  $P>1$  时,表示在第  $i$  类景观生态风险等级在第  $e$  类地形梯度区间下呈现优势分布,反之则呈劣势分布。

### 2.2 景观生态风险评价单元划分

本文采用网格抽样法,以网格为评价单元,运用 ArcGIS 10.2 的渔网工具将研究区划分为若干个网格。根据研究区实际情况,参考相关研究成果<sup>[1-2]</sup>,景观样本面积应达到该区域景观斑块平均面积的 2~5 倍,样本才能有效综合反映采样点周围景观的格局信息,考虑计算精度和强度,采用 4 km×4 km 的正方形网格对研究区进行划分,共划分了 4 002 个网格、采集样点 4 002 个。在对每个网格进行统一编号的基础上,对每个网格单元的景观生态风险值进行计算,并以该数值作为每个网格中心点的景观生态风险值,再采用普通克里格插值法在 ArcGIS 10.2 中进行插值,可得到整个研究区域的景观生态风险值。

### 2.3 景观生态风险指数模型构建

综合已有的研究成果<sup>[11]</sup>,选取景观干扰度指数( $U$ )和景观脆弱度指数( $S$ )构建景观生态风险指数(ERI)(公式 3—4)。景观干扰度指数( $U$ )由景观破碎度、景观分离度、景观分维数加权求和得到,景观脆弱度指数( $S$ )由专家打分法归一化后获得,相关指数值计算公式及含义见表 2。

$$ERI_k=\sum_{i=1}^n\frac{A_{ki}}{A_k}R_i \quad (3)$$

$$R_i=U_i\times F_i \quad (4)$$

式中: $ERI_k$  为第  $k$  个网格区域的景观生态风险值; $n$  为第  $k$  个风险小区中包含的景观类型个数; $A_{ki}$  为第  $k$  个网格区域中第  $i$  种景观类型的总面积; $A_k$  为第  $k$  个网格区域的面积; $R_i$  为第  $i$  类景观的景观损失度指数; $U_i$  为第  $i$  类景观的景观干扰度指数; $F_i$  为第  $i$  类景观的景观脆弱度指数<sup>[3,11]</sup>。

### 2.4 景观生态风险等级变化类型

根据研究区景观生态风险等级变化特征,本研究将景观生态风险等级变化模式分为 5 种。分别为稳

定型(景观生态风险等级不发生变化)、前期变化型(景观生态风险等级只在 2000—2010 年发生改变)、后期变化型(景观生态风险等级只在 2010—2020 年发生改变)、反复变化型(景观生态风险等级在 2000 年和 2020 年相同,且在 2010 年发生变化)、持续变化型(景观生态风险等级在 2000 年、2010 年、2020 年均不相同)。在 ArcGIS 10.2 中进行叠加分析即可得到景观生态风险变化类型图。

表 2 景观格局指数计算公式及含义

序号	指数	计算公式	含义
1	景观破碎度指数	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	描述景观的破碎化程度,在一定程度上反映人类对景观的干扰程度。式中: $n_i$ 为研究区内第 $i$ 类景观的斑块数目; $A_i$ 为研究区内第 $i$ 类景观的面积 <sup>[21]</sup>
2	景观分离度指数	$N_i = l_i \times A / A_i$ $l_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$	描述某一景观的分离程度,分离指数越大,表示景观分布越复杂,破碎化程度越高。式中: $l_i$ 为第 $i$ 类景观的距离指数; $A$ 为研究区总面积 <sup>[22]</sup>
3	景观分维数	$S_i = \frac{2\ln(P_i/4)}{\ln A_i}$	描述斑块或景观镶嵌体几何形状复杂程度的非整型维数值。式中: $P_i$ 为第 $i$ 类景观的周长;其他字母含义同上式
4	景观干扰度指数	$U_i = aC_i + bN_i + cS_i$	反映不同区域受到干扰后的损失程度, $a, b, c$ 为各景观格局指数的权重,综合已有研究成果 <sup>[21]</sup> 和研究区实际,取 $a=0.5, b=0.3, c=0.2$ ;其他字母含义同上式
5	景观脆弱度指数	由专家打分法归一化后获得	表示不同景观类型对外界干扰的易损性和敏感性,采用专家打分法归一化后获得。其中:耕地取 0.19,林地取 0.13,草地取 0.18,建设用地取 0.03,水域取 0.22,未利用地区 0.25

3 结果与分析

3.1 三峡库区景观生态风险等级分布特征

采用普通克里金法进行插值,根据景观生态风险指数模型(公式 3—4),可获得整个研究区的景观生态风险值(简称“ERI”)。根据 ERI 值,再利用自然断点法<sup>[4,6]</sup>将研究区划分为 5 个级别风险区,即低风险区( $0 \leq \text{ERI} < 0.75$ )、较低风险区( $0.75 \leq \text{ERI} < 0.87$ )、中风险区( $0.87 \leq \text{ERI} < 0.98$ )、较高风险区( $0.98 \leq \text{ERI} < 1.07$ )、高风险区( $1.07 \leq \text{ERI}$ )。不同时期不同风险区的规模结构和空间分布见表 3,图 1。由表 3 可知,2000—2020 年,较高风险区面积逐年减少,低风险区和中风险区面积逐年增加,高风险区面积先增加后减少,较低风险区面积先减少后增加。中风险区面积增加最多(4 611.63 km<sup>2</sup>),较高风险区面积减少最多(7 178.34 km<sup>2</sup>)。参考已有的研究成果,按照行

政区可将整个库区划分为库区上游、中游、下游<sup>[23]</sup>。从图 1 可以看出,低风险区主要位于库区上游的重庆市主城区,2010—2020 年低风险区面积增长较快。重庆市主城区主要的土地利用类型为建设用地,景观格局发生改变的可能性小,因此是整个研究区景观生态风险值最低的区域,随着经济高速发展建设用地快速扩张,低风险区面积也逐渐增加。较高风险区和高风险区主要位于江津区、巴南区、长寿区、涪陵区、丰都县、忠县、万州区,土地利用类型主要为耕地和草地。这些区域经济发展较快,建设用地正处于快速扩张中,生态环境受到人为扰动较大,景观格局容易发生改变,因此景观生态风险值较高。较低风险区则主要集中在库区中游、下游的奉节县、巴东县、巫山县、巫溪县等区域,这些区域是高海拔地区,植被覆盖度高,人类活动对生态环境扰动较小,景观格局发生改变的可能性小,景观生态风险值较低。

表 3 景观生态风险等级结构 km<sup>2</sup>

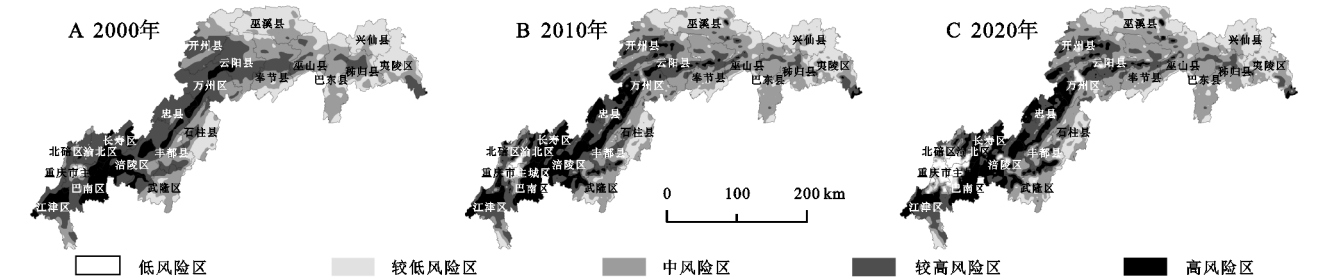
景观生态 风险等级	面积			变化面积		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
低风险区	147.28	395.46	1497.25	248.18	1101.79	1349.98
较低风险区	13461.56	11641.95	11992.18	—1819.61	350.23	—1469.38
中风险区	17497.49	21348.46	22109.13	3850.97	760.66	4611.63
较高风险区	20121.73	13742.33	12943.39	—6379.40	—798.94	—7178.34
高风险区	6355.06	10454.92	9041.17	4099.86	—1413.75	2686.11

3.1.1 景观生态风险等级的坡度与高程特征 如图 2—3 所示,2000 年与 2020 年相比,低风险区在 1,2 两个坡度级上的分布指数下降,在 3—8 区间上的分布指数逐年上升;在高程级别上低风险区在 1—2 区间上分布指数下降明显,在 3 区间上的分布指数则从 0.04 上升到了 0.62,这表明低风险区在坡度大于 6°,



400~600 m 的高程区间扩散较多。在坡度级别上,较低风险区的分布指数在 1—3 区间上升,在 4—8 区间分布指数下降;在高程级别上,较低风险区的分布指数在 1—3 区间和第 8 区间上升,在 4—7 区间分布指数整体下降;表明较低风险区的分布向坡度小于 10° 的区域,以及高程小于 600 m 和大于 1 800 m 的区域集中。中风险区的分布指数在 高程和坡度级别上均呈现先增加后减少的态势,整体来看中风险区在坡度小于 15° 的

区域,高程小于 400 m 和高程大于 1 200 m 的区域扩散较多。在坡度级别上,较高风险区在 1—3 区间上的分布指数逐年下降,在 4—8 区间上的分布指数逐年上升;在 高程级别上,较高风险区的分布指数在 2, 6 区间下降,其余区间分布指数均增加;整体而言较高风险区的分布向坡度大于 10° 的区域集中。2000 年与 2020 年相比,高风险区在坡度大于 15°、高程大于 400 m 的区域扩散较多。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)1605 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 景观生态风险等级分布

3.1.2 景观生态风险等级的地形位指数特征 地形位指数综合了高程变化和坡度的信息特点,可以重新计算研究区景观生态风险的地形分布特征。由图 4、表 4 可知,低风险区的分布指数在地形位级别上呈现先增加后减少的态势,分布指数的最大值在第 3 区间。2000 年与 2020 年相比,低风险区的分布指数在 1—3 区间的分布指数下降,分布指数分别从 1.50, 5.91, 6.48 下降到了 1.40, 4.93, 5.25, 在其余区间分布指数均增加,这表明低风险区在地形位指数大于 0.62 的区域扩散较多。较低风险的分布指数随地形指数的增加而上升。整个研究期间,较低风险区的分布指数在 1—5 区间增加,分布指数分别从 0.20, 0.11, 0.09, 0.10, 0.18 上升到了 0.32, 0.38, 0.38, 0.27, 0.26, 在 6—8 区间减小,分别从 0.38, 1.21, 2.86 下降到了 0.37, 1.08, 2.85, 表明较低风险区的分布往地形位指数小于 1.03 的区域集中。中风险区的分布指数在地形位级别上呈现先增加后减少的态势,分布指数最大值在第 7 区间。中风险区的分布指数在 1—4 区间增加明显,分别从 0.27, 0.34, 0.29, 0.37 上升到了 0.65, 0.52, 0.41, 0.43, 在 5 区间和 8 区间分布指数小幅度上升,在 6, 7 区间分布指数分别从 1.01, 1.45 下降到了 0.98, 1.40, 表明中风险区的分布向地形位指数小于 1.03 和大于 1.85 的区域扩散较多,在地形位指数小于 1.03 的区域扩散明显。较高风险区的分布指数在地形位梯度上呈现先减少后增加的趋势。2000 年、2010 年分布指数最大值在第 1 区间,2020 年分布指数最大值则在第 5 区间。2000 年与 2020 年相比,在 1—4 区间分布指数下降,分别从 1.78, 1.66, 1.64,

1.61 下降到了 1.51, 1.30, 1.22, 1.46, 5—8 区间分布指数逐年上升,表明较高风险区的分布往地形位指数大于 0.82 的区域集中。2000 年、2010 年高风险区的分布指数在地形位级别上呈现先增加后减少的趋势,2020 年则呈现先减少后增加的态势。2000 年、2010 年分布指数最大值在第 3 区间,2020 年分布指数最大值则在第 4 区间。2000 年与 2020 年相比在 1—5 区间分布指数均下降明显,分别从 2.23, 2.50, 2.80, 2.55, 1.89 下降到了 1.96, 1.91, 2.26, 2.42, 1.87, 在 6—8 区间,分布指数分别从 1.08, 0.28, 0.01 上升到了 1.14, 0.40, 0.10, 表明高风险区在地形位指数大于 1.03 的区域扩散较多。

3.2 景观生态风险等级变化类型地形位指数特征 将 2000 年、2010 年、2020 年景观生态风险等级进行叠加分析,得到的结果见图 5, 表 5。由表 5 可知,研究区景观生态风险等级变化类型以稳定型为主,占总面积的 69.50%, 其次是前期变化型、后期变化型、反复变化型、持续变化型,占比分别为 16.73%, 8.79%, 2.62%, 2.37%。前期主要的变化类型为“较高—高—高”转换, 其次是“较低—中—中”“较高—中—中”转换, 这 3 个类型的转化面积占比分别达到了 5.70%, 4.20%, 3.86%, 而在后期则主要是“较高—较高—中”“较高—较高—中”“较低—较低—中”这 3 个类型转化占比较大, 面积占比分别为 1.81%, 1.29%, 1.25%。由此可知,高风险区面积增加主要来源于前期较高风险区的转化,而较低风险区的减少则也是在前期转化为了中风险区。在后期则主要是较高风险区向中风险区和高风险区的转化。

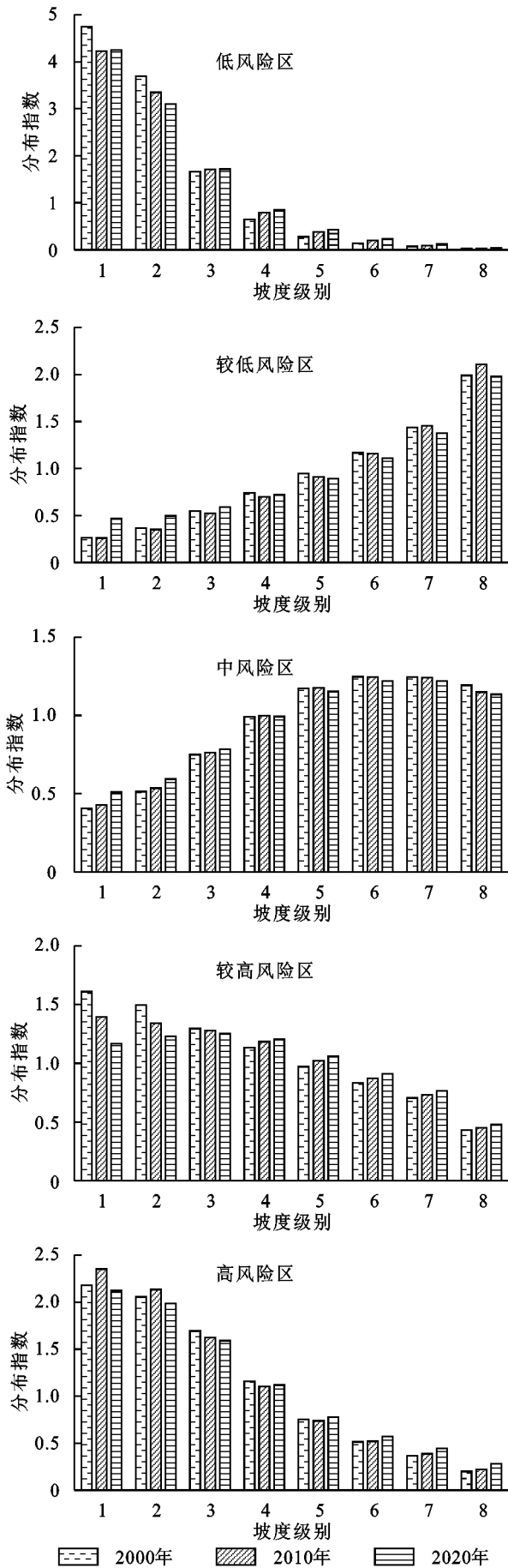


图2 景观生态风险等级在坡度级别上的分布指数

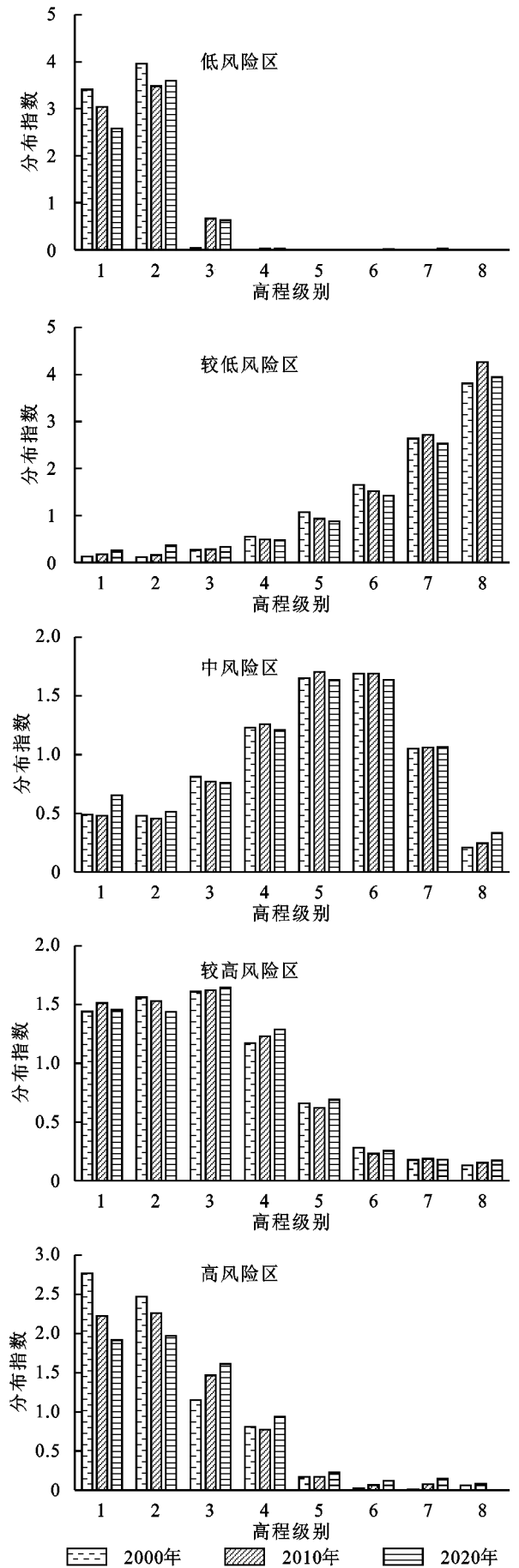


图3 景观生态风险等级在高程级上的分布指数

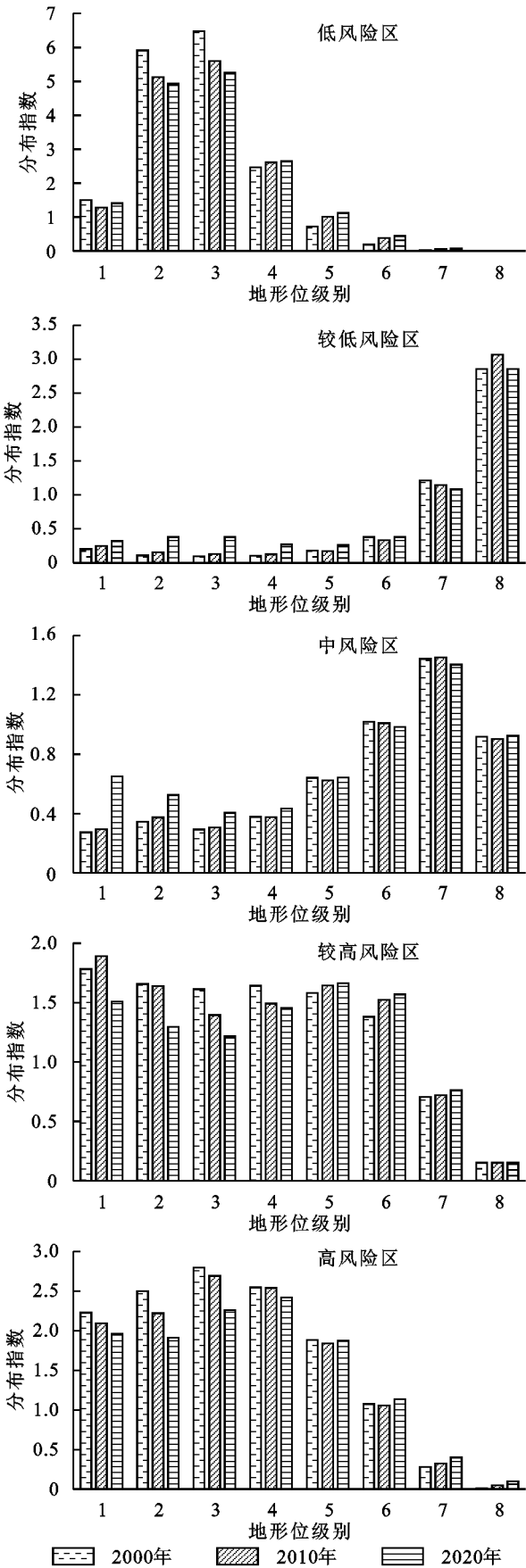


图 4 景观生态风险等级在地形位上的分布指数

将景观生态风险等级变化类型与地形位级别数据进行叠加,可得各变化类型在不同地形位级别上的分布

指数(图 6)。稳定型的分布指数在地形位级别上呈现逐渐上升趋势,其优势分布集中在地形位指数大于 1.24 的区域,表明景观生态风险发生改变的区域集中在地形位指数小于 1.24 的区域。持续变化型和前期变化的分布指数在地形位指数级别上呈现先增加后减少的态势,持续变化型优势分布于地形位指数小于 1.03 的区域,前期变化型则优势分布于地形位指数 0.62~1.85 的区域。反复变化型的分布在地形位级别上呈现先减少后增加的趋势,分布指数最大值在第 1 区间,其优势分布集中在地形位指数小于 1.24 的区域。后期变化型的分布指数随地形位级别的上升而下降,其优势分布集中在地形位指数小于 1.03 的区域。

表 4 景观生态风险等级在地形位指数上的优势分布区间

风险区类型	优势分布区间		
	2000 年	2010 年	2020 年
低风险区	1—4	1—5	1—5
较低风险区	7—8	7—8	7—8
中风险区	6—7	6—7	7
较高风险区	1—6	1—6	1—6
高风险区	1—6	1—6	1—6

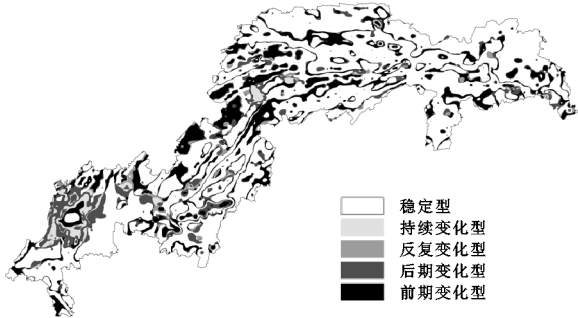


图 5 景观生态风险等级转换类型

3.3 景观生态风险等级变化特征

综合各景观生态风险等级在地形位指数上的分布和景观生态风险转移矩阵来看(表 6),低风险区优势分布集中在地形位指数小于 0.82 的区域,该区域主要位于库区上游的重庆市主城区地带,土地利用类型主要为建设用地。整个研究期间,低风险区在地形位指数大于 0.62 的区域扩散明显,且在 2010—2020 年面积增加较多。这表明随着城市建设的快速发展,当平坝区域的土地逐渐被开发、占用以后,建设用地开始向丘陵地带扩散。因此,低风险区在坡度值、高程值较大的区域分布指数呈上升趋势。

较低风险区优势分布集中于地形位指数大于 1.24 的区域,主要位于大巴山区和武陵山区,主要的土地利用类型为海拔较高、坡度较大的林地。整个研究期间较低风险区面积减少了 1 469.38 km<sup>2</sup>,转出的面积主要转化为了中风险区,转化主要发生在 2000—2010 年。从地形位级别上分布指数的变化趋势来看,面积减少的区域主要位于地形位指数大于 1.03 的区域。

表 5 主要景观生态风险等级变化类型面积占比

前期变化型	占比/%	后期变化型	占比/%	反复变化型	占比/%	持续变化	占比/%
较高—高一高	5.70	较高—较高—中	1.81	较高—高一较高	1.37	较高—中—低	0.46
较低—中—中	4.20	较高—较高—高	1.29	较—中—较高	0.55	较高—高一中	0.41
较高—中—中	3.86	较低—较低—中	1.25	中—较高—中	0.24	较高—中—较低	0.26
中—较高—较高	1.11	高—高一较高	0.88	中—较低—中	0.23	较高—高一中	0.24
中—较低—较低	0.91	中—中—较低	0.74	较低—中—中	0.18	较高—高一低	0.17
合计	15.78	合计	5.97	合计	2.58	合计	1.54

注:“较高—高一高”表示 2000 年、2010 年、2020 年该区域景观生态风险等级分别为较高风险区、高风险区、高风险区,2000—2010 年该区域景观生态风险等级由较高风险区转化为了高风险区,2010—2020 年景观生态风险等级不发生改变。

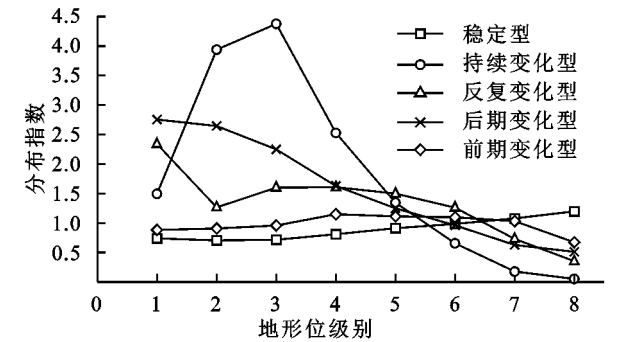


图 6 景观生态风险等级转换类型在地形位级别上的分布指数

中风险区优势分布集中于地形位指数大于 1.03 的区域。主要位于库区中下游的武隆区、石柱县、奉节县、巫山县等区域,土地利用类型主要为耕地和草地。中风险区面积增加主要来源于较低风险区和较高风险区的

转化,转化的时间主要发生在 2000—2010 年,转化的区域则集中在地形位指数小于 1.03 的区域。

高风险区和较高风险区主要位于库区上游的丘陵地带和库区中游川东平行岭谷地带。该区域地势相对平缓,经济发展快速,景观格局受人类活动影响发生改变的可能性大,整体景观生态风险值较高。整个研究期间,较高风险区减少的部分主要转出为高风险区和中风险区,高风险区增加也主要来源于较高风险区的转化。高风险区在地形位指数大于 1.03 的区域分布指数均呈上升趋势,表明较高风险区向高风险区的转化也主要发生在该区域。而较高风险区向中风险区的转化则集中在地形位指数小于 1.03 的区域,该区域景观生态风险值下降,景观格局稳定性得到提升。

表 6 2000—2020 年景观生态风险等级转移矩阵 km<sup>2</sup>

年份	风险区类型	2020 年				
		低风险区	较低风险区	中风险区	较高风险区	高风险区
2000 年	低风险区	147.28	177.01	265.97	752.22	154.77
	较低风险区		10134.21	967.03	689.30	201.64
	中风险区		3138.35	15161.91	3502.03	306.85
	较高风险区		12.00	1018.55	11151.92	760.92
	高风险区			84.04	4026.25	4930.88
	合计	147.28	13461.56	17497.49	20121.73	6355.06

4 结论

(1) 三峡库区景观生态风险等级分布呈现较强的空间分异特征,各景观生态风险区面积呈现动态变化。低风险区主要分布在重庆市主城区以及部分平坝区域,高风险区和较高风险区则主要分布在库区上游、中游的丘陵地带和川东平行岭谷区,中风险和较低风险区主要分布在库区中游的武陵山区以及库区下游的大巴山区、鄂西山地。整个研究期间,低风险区、中风险区、高风险区面积分别增加 1 349.98, 4 611.63, 2 686.11 km<sup>2</sup>,较低风险区和较高风险区面积分别减少 1 469.38, 2 686.11 km<sup>2</sup>。

(2) 景观生态风险等级变化类型以稳定型为主,景观生态风险等级发生改变的区域集中于地形位指数小于 1.24 的区域。在前期(2000—2010 年)发生的转化主要为“较高—高一高”“较低—中—中”“较高—中—中”型转换,后期(2010—2020 年)发生的转化则主要是“较高—较高—中”“较高—较高—高”“较低—较低—中”型转化。整体而言,高风险区、中风险区面积的增加,较低风险区和较高风险区面积的较少主要发生在前期,而低风险区面积的增加则主要发生在后期。

(3) 从景观生态风险等级在地形梯度上分布指数变化特点来看,库区上游的低风险区向非优势分布



的区间扩散较多,主要集中在地形位指数大于 0.62 的区域。较低风险区的分布向地形位指数小于 1.03 的区域集中。库区中下游主要发生了较高风险区向高风险区和中风险区转化,向高风险区转化的区域集中在地形位指数大于 1.03 的区域,向中风险区转的区域则集中在地形位指数小于 1.03 的区域,较高风险区的分布往地形位指数大于 0.82 的区域集中。

综合考虑三峡库区景观生态风险等级在地形梯度上的变化,未来土地政策可根据地形梯度因地制宜。库区上游海拔低、坡度小,是低风险区主要分布的区域,同时也是土地政策调整的关键区域<sup>[24]</sup>,在该区域应减缓建设用地侵占耕地的速度,科学合理规划利用土地,优化土地利用结构<sup>[25]</sup>,抑制低风险区向高坡度、高高程值区域扩散。库区中游应做好水土保持工作,减少泥石流和滑坡等自然灾害的发生,加强防护林建设以及“退耕还林还草”的有序实施,通过提升景观稳定性抑制高风险区的蔓延。库区下游则应严格限制耕地规模,设立自然保护区,减少人类活动对生态环境的干扰,注重生态效益的发展,抑制较低风险区向中风险区转化。

#### 参考文献:

- [1] 张月,张飞,周梅,等.干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J].应用生态学报,2016,27(1):233-242.
- [2] Peng J, Pan Y, Liu Y, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. Habitat International, 2018,71:110-124.
- [3] 熊鹰,汪敏,袁海平,等.洞庭湖区景观生态风险评价及其时空演化[J].生态环境学报,2020,29(7):1292-1301.
- [4] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及时时空分异[J].中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.
- [5] 于海洋,张飞,曹雷,等.基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2017,37(19):6355-6369.
- [6] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报,2020,40(18):6472-6485.
- [7] 王燕,刘彦斌,赵红雪,等.宁夏沙湖水水质评价及水污染特征[J].湿地科学,2020,18(3):362-367.
- [8] 韩善红,王超,刘晓鹏,等.连云港市水稻产区土壤重金属分布特征及污染评价[J].西南师范大学学报:自然科学版,2021,46(8):74-78.
- [9] 贾佳瑜,刘小芳,赵勇钢,等.汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(8):132-137.
- [10] 高彬斌,李琛,吴映梅,等.川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1603-1613.
- [11] 杨庚,张振佳,曹银贵,等.晋北大型露天矿区景观生态风险时空异质性[J].生态学杂志,2021,40(1):187-198.
- [12] 杨斌,王占岐,姚小微,等.鄂西北山区土地利用的地形梯度效应与空间结构特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):313-321.
- [13] 张平,陆龙妹,王世航,等.基于地形梯度的皖南地区土地利用分布特征[J].土壤,2018,50(5):1041-1045.
- [14] 程辉.不同土地利用方式对三峡库区消落带库湾生态系统的影响研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [15] 李桂媛.三峡库区城镇空间多维耦合关系研究[D].武汉:武汉大学,2015.
- [16] 李辉,张晓媛,国洪磊.基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(2):309-318.
- [17] 邹欣怡,赵伟,蒲海霞.三峡库区重庆段土地利用转型及生态服务功能价值时空分异特征[J].水土保持研究,2021,28(2):267-275.
- [18] 龚熊波,杨波,刘雨先,等.湘西州山区土地利用类型的地形梯度效应与景观格局分析[J].生态科学,2020,39(4):137-144.
- [19] 王敏,吴映梅,胡平平.地形梯度视域下的云南山区土地利用时空格局变化研究[J].江西农业学报,2020,32(4):123-131.
- [20] 王权,李阳兵,刘亚香,等.基于地形梯度的岩溶槽谷区土地利用空间格局分析[J].生态学报,2019,39(21):7866-7880.
- [21] 崔闪闪,刘庆,王静.滨海开发带景观格局指数的尺度效应及对土地利用变化的响应:以江苏省大丰市为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(6):87-93.
- [22] 赵兵,赵鹏蕾,韦薇.花桥典型地块景观格局及植被群落结构指数评价与制图研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1169-1179.
- [23] 阳华.三峡库区生态系统服务价值与经济发展的重心演变特征及耦合研究[D].重庆:重庆工商大学,2021.
- [24] 梁彦庆,官洋溢,黄志英,等.京津冀土地绿色利用与经济增长耦合协调的时空异质性研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(12):1522-1531.
- [25] 邵明超,宋宏利,尚明,等.多源土地覆被数据类别一致性及其景观格局差异性:以京津冀区域为例[J].生态学报,2020,39(11):3881-3889.