基于景观格局的石林彝族自治县景观生态风险评价*

苗 雪[1] 金 京[2] 冷从斌[3] 陈 鑫[1] 可凯勒[1] 彭建松[1]

1 西南林业大学园林园艺学院 昆明 650224

2 西南林业大学林学院 昆明 650224

3 国家林业和草原局西南调查规划院 昆明 650031

摘要：基于石林彝族自治县 2000—2020 年遥感影像，利用 ENVI、ArcGIS 以及 Fragstats4 景观分析软件对研究区景观结构的组成及转变进行量化处理，建立石林县生态风险评价体系。结果表明：1）耕地占石林县总面积的 50%以上，2000—2020 年耕地面积减少 27.51 km^2，不透水面面积增加 41.60 km^2，林地、草地面积变化不活跃，但在 2010—2020 年呈下降趋势。2）20 年间石林县综合生态风险变化较为剧烈，风险指数在 2010 年达到峰值（0.312 9），其中水体景观作为高危风险景观，其指数在 2010 年高达 2.379 3；耕地作为石林县对景观生态影响最大的因子，其贡献权重高达 52%。3）由于强烈的人类活动，研究区以高生态风险区为主，占研究区总面积的 66.5%。总之，整个研究期间，石林彝族自治县的生态环境呈现局部改善和部分退化并存的状态，景观生态安全呈现较好的趋势，建议从调节当地产业结构入手，针对不同风险区制定相应措施，妥善处理生态保护与经济建设之间的关系。

关键词：土地利用；时空演化；景观格局；生态风险；空间自相关分析

DOI：10.12169/zgcsly.2023.02.07.0001

Ecological Risk Assessment of Landscapes in Shilin Yi Autonomous County Based on Landscape Pattern

Miao Xue[1] Jin Jing[2] Leng Congbin[3] Chen Xin[1] Ke Kaile[1] Peng Jiansong[1]

(1. College of Landscape and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. Southwest Survey and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, China)

Abstract: Based on remote sensing images of Shilin Yi Autonomous County from 2000 to 2020, the composition and transformation of landscape structure in the study area are quantified using ENVI, ArcGIS and Frastats4 landscape analysis software to establish an ecological risk evaluation system. The results show: 1) Arable land accounts for more than 50% of the total land area of Shilin. Arable land decreased in area by 27.51 km^2, and impervious surface increased by 41.60 km^2 from 2000 to 2020, while the area of forests and grasslands have a slight change, but showing a decreasing trend in 2010-2000; 2) The comprehensive ecological risk in Shilin had changed dramatically during the 20 years, and the risk index reached the peak at 0.312 9 in 2010. The index of water landscape which is a high-risk landscape was as high as 2.379 3 in 2010, and arable land, with the greatest ecological impact on the landscape in Shilin, contributed as high as 52% to the weight; and 3) The study area is dominated by high ecological risk areas due to frequent human activities, which accounts for 66.5% of the total area of the study area. To sum up, the ecological environment of Shilin showed a trend of improvement-degradation coexistence with

收稿日期：2023-02-07

* 基金项目：云南省森林城市发展规划项目（2020—2035、1863112）；云南省高校质量工程项目（515006056）

第一作者：苗雪（1996- ），女，硕士生，研究方向为风景园林规划与设计。Email：819272674@qq.com

通信作者：彭建松（1973- ），男，副教授，研究方向为城市森林。Email：1006489155@qq.com

better landscape ecological security throughout the study period. It is suggested that the relationship between ecological protection and economic development should be properly settled through regulating the local industrial structure and formulating corresponding measures for different risk areas.

Keywords: land use; spatial and temporal evolution; landscape pattern; ecological risk; spatial auto-correlation analysis

景观格局作为生态环境管理的基础单元，是人类活动的主要作用面，其变化必然会引起生态系统功能的改变。土地利用/覆被（LUCC）是人类利用自然资源最直接的表现形式，其利用方式和配置结构是否合理，在一定程度上影响着当地的生态环境[1]。景观生态风险评价是以景观格局为切入点，综合评估区域生态环境可能面临的不利影响和危害程度，对区域景观结构优化、社会经济可持续发展具有指导意义[2]。自 20 世纪 90 年代生态风险概念由国家环保局提出后，众多学者对其展开了大量的研究。近 30 年来，生态风险评价由单风险源、单一受体的局部小尺度区域扩展到多风险源、多受体的大尺度区域综合生态风险评价[3-4]。在评价尺度上，通过 GIS 选取最佳粒度单元实现景观生态风险预警的精细化[5-6]。在测量方法上，多以景观格局指数和土地利用类型赋值指数进行多维风险研判[7-8]。虽然生态风险评估的研究范式相对成熟，但在评价对象的选择上，仅侧重州、市、流域、矿区等人类活动密集区，缺乏对生态系统变异度高、灾变承受能力低的喀斯特地貌地区的风险评估研究。因此，对喀斯特地貌区的生境质量状况进行监督评价，有助于优化喀斯特地区土地资源，维持其景观结构稳定。

石林彝族自治县（以下简称石林县）拥有世界上罕见的多阶段复杂地质演化历史，2002 年它凭借独特且丰富的大陆剑状喀斯特地貌入选联合国世界自然遗产。近 20 年，高强度的人类活动导致石林县域内生态环境退化，生态调控能力明显减弱，严重限制了区域社会经济的发展。因此，本研究基于喀斯特地区本底环境特征与生态作用机制的系统分析，以 10 年为间隔，运用 2000—2020 年 3 期土地利用类型遥感数据，从土地利用变化、景观脆弱度指数和景观干扰度指数，共同搭建石林县景观生态风险评价体系，并以此为基础提出针对性的优化策略，为后期石林县的土地利用结构优化提供依据。

1　研究区概况

石林县位于云南中东部（24°30′—25°03′ N、103°10′—104°40′ E），境内以高原丘陵、石林为主，东北高西南较低，石林凭借独特的古生态岩溶地貌被誉为“天下第一奇观”。研究区气候属低纬高原山地季风气候，境内用地类型以耕地为主，2000 年耕地面积占研究区总面积的 53.36%，面积过大且零碎的耕地，使石林县生态用地数量急剧萎缩，水土流失问题加剧，生态自我调控能力锐减。

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

本研究以 10 年为间隔，选用 2000—2020 年 3 期石林县 Landsat 遥感影像数据（分辨率为 30 m），利用 ENVI 软件对图像进行辐射定标、大气校正等预处理；采用监督分类和目视解译的方法对影像进行地类解译，同时采用等间距法将研究区划分为 5 km×5 km 的研究小区。基于相关资料分析[9-11]和实地勘察，将石林县划分为 5 类景观要素：耕地、林地、草地、水体、不透水面。

2.2　土地利用动态分析法

通过对研究区 2000—2020 年土地利用数据进行空间计算，得到研究区 3 期土地利用类型之间的转化量。使用叠加代数计算的方法对不同土地利用类型的来源、构成及转化特征进行量化，形成了石林县的土地利用转移矩阵[10]。

2.3　土地利用生态风险指数法

景观指数是通过定量的形式对景观进行空间分析，从而揭示研究区域内生态景观的结构特征和时空格局发展[12]。本研究结合研究区域特征和景观指数的生态相关性，选取景观破碎度、景观分离度、景观分维数、景观干扰度及景观脆弱度作为生态风险的量化指标。通过选取景观干扰度指数和景观脆弱度指数来建立景观生态风险指

数[13]，公式为：

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

式（1）中：ERI_i是风险小区 i 的景观生态风险指数；A_{ki}代表第 k 风险小区中景观类型 i 的面积；A_k表示第 k 个风险小区的总面积；R_i表示 i 类景观的损失度指数。R_i计算公式如下：

$$R_i = E_i \times V_i \quad (2)$$

式（2）中：E_i为景观干扰度指数；V_i为景观脆弱度指数；参考相关文献[14-15]并结合研究区特点，将景观类型的脆弱性赋值为：水体 0.33、耕地 0.27、草地 0.20、林地 0.13、不透水面 0.07。

3 结果与分析

3.1 石林县土地利用时空变化特征

3.1.1 石林县土地利用结构变化

石林县土地利用结构以耕地为主，在空间上呈镶嵌交错分布。根据 2000—2020 年 3 个时期的土地覆被类型（图 1、图 2）可以看出：耕地作为石林县主要的土地利用类型，占石林县面积的 50%以上，主要集中在大可乡、板桥街道办事处以及鹿阜街道办事处；其次为草地，占石林县面积的 25%左右，主要分布在西街口镇、长湖镇与石林街道办事处和鹿阜街道办事处接壤地区；林地占石林县面积的 20%左右，主要分布在圭山镇及长湖镇的中部及东部；其他用地类型所占面积较少。具体来看：不透水面作为人类活动较为频繁的区域，2000—2010 年不透水面的面积变化不大，但在 2010—2020 年不透水面的用地面积呈大幅增长态势，表现为由鹿阜街道办事处中部向四周扩张；水体面积呈现“V”型变化，由占县域总面积的 1.04%（2000 年）下降到 0.42%（2010 年），到 2020 年虽增长到 0.70%，但和 2000 年相比，水体面积仍呈缩减状态；林地和草地面积变化程度虽然不活跃，但值得注意的是这两个用地面积在 2010—2020 年呈下降趋势。总之，石林县土地利用整体结构呈现较为稳定的状态。20 年间耕地、林地、草地呈下降趋势，其中耕地面积减少趋势较为明显；水体、不透水面面积呈增加趋势，其中不透水面面积增加的幅度较大，变化程度较为明显。

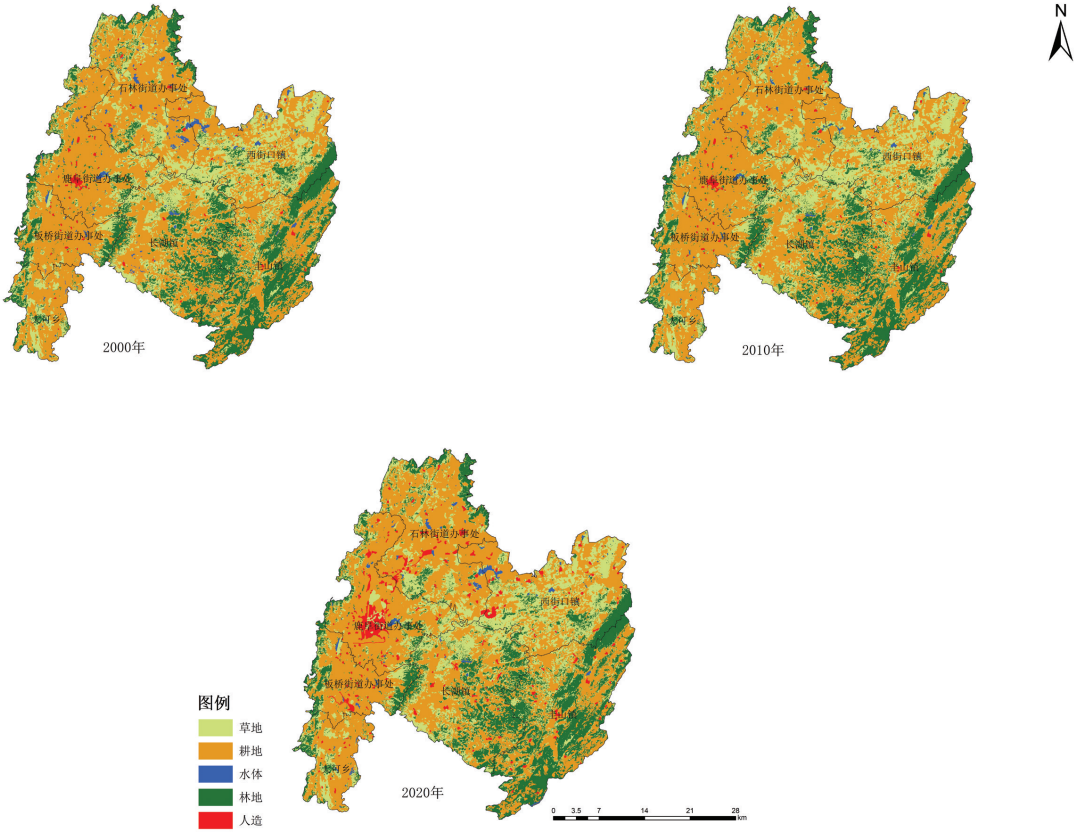


图 1 石林县 2000—2020 年土地利用/覆被类型

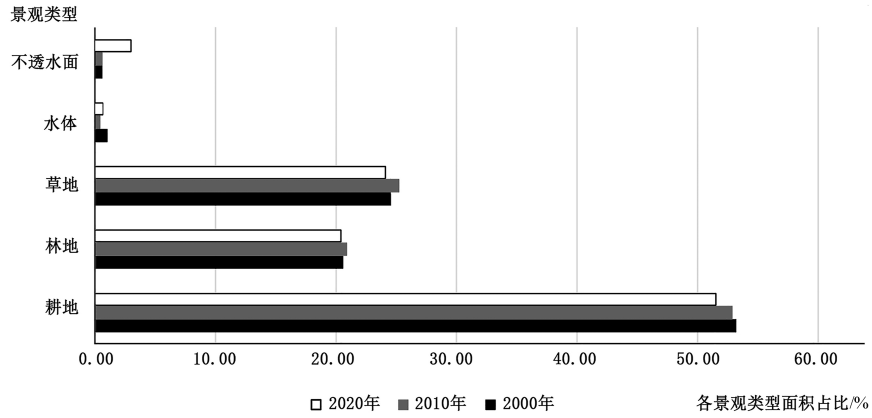


图 2　石林县 2000—2020 年各景观类型面积

3.1.2　石林县土地利用转移矩阵

通过 Arc GIS 对 3 期土地利用类型进行叠加，生成研究区 2000—2020 年土地利用转移矩阵（表 1）。从 2000—2020 年不同土地利用类型相互转化情况看，20 年间研究区各景观要素都存在一定程度的交换，其交换总面积约为 258.88 km^2。整体来看，2000—2020 年土地利用类型转出面积的顺序依次为耕地>草地>林地>水体>不透水面，而转入面积为不透水面>草地>耕地>林地>水体。从转出结果来看，耕地的转出面积最大，转为不透水面、草地、林地和水体的面积分别为 31.29、22.52、4.64、1.55 km^2；其次是草地转为耕地、林地、不透水面和水体的面积分别为 24.58、9.45、7.74、0.52 km^2。从转入来看，不透水面转入面积最大，主要来源于耕地、草地、林地和水体，分别为 31.29、7.74、3.27、0.17 km^2。从时间序列来看，石林县在整个转化过程中，耕地、草地和不透水面体现出大幅度的转出、转入变化，其中耕地和草地呈现双向转化的特点，而不透水面则以单向的转入为主。20 年间石林县得益于当地政府充分发挥旅游资源、挖掘当地文化，特别是 2010 年以后不透水面面积的骤增在一定程度上反映了石林县人口增加和人民生活条件的改善。随着国家对生态环境保护的逐渐重视，水体面积有明显的增加。总体来说，石林县土地利用类型的时序变化在一定程度上反映了当地政府对生态环境保护及社会经济发展的干预程度。

表 1　研究区 2000—2020 年土地利用类型转移矩阵

年份		2020						
	地类	草地	耕地	林地	不透水面	水体	2000 年合计	流出合计
2000	草地	378.18	24.58	9.45	7.74	0.52	420.30	42.12
	耕地	22.52	857.27	4.64	31.29	1.55	917.26	59.99
	林地	9.97	4.64	335.03	3.27	0.52	353.43	18.39
	不透水面	0.34	0.34	0.00	9.63	0.00	10.31	0.69
	水体	2.75	2.75	2.41	0.17	9.63	17.71	8.25
	2020 年合计	413.59	889.75	351.71	51.91	12.03	1719.00	
	流入合计	35.41	32.49	16.67	42.46	2.41		

3.2　石林县景观生态风险时空变化特征

3.2.1　石林县景观生态风险时序变化

石林县 3 个时期综合景观生态风险指数呈现先增长后降低的倒“V”型变化趋势，表明石林县生态安全状态总体趋于好转。从各土地利用类型景观生态风险指数来看（表 2），20 年间景观生态风险的变化特征整体也是呈现先增加后降低的状态，各景观类型的景观生态风险指数大体可以分为 3 个阶梯：水体属于景观生态风险的第一阶梯，其景观生态风险值在 1.00 以上；第二阶梯为耕地及草地，景观生态风险值在 0.26~0.32 之间；第三阶梯是 0.26 以下的林地和不透水面。从各景观类型的景观生态风险贡献权重来看，耕地对石林县景观生态影响最大，其贡献权重高达 52%；其次是草地和林地，景观生态风险贡献权重分别在 0.24 和 0.20。综上，20 年间石林县生

态风险变化相对较大，但整体走势趋于好转，耕地、林地和草地的生态风险变化对石林县的综合景观生态风险影响较大，水体景观生态风险的降低对于优化石林县综合景观生态潜力较大。

表 2 研究区 2000—2020 年景观生态风险指数及贡献权重

景观类型	景观生态风险指数			贡献权重		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020
耕地	0. 262 2	0. 319 1	0. 270 3	0. 52	0. 52	0. 52
林地	0. 246 2	0. 253 1	0. 249 5	0. 20	0. 20	0. 20
草地	0. 267 0	0. 276 9	0. 263 2	0. 24	0. 24	0. 24
水体	1. 140 2	2. 379 3	1. 655 2	0. 01	0. 01	0. 01
不透水面	0. 141 9	0. 204 6	0. 115 3	0. 03	0. 03	0. 03
综合景观生态风险	0. 265 3	0. 312 9	0. 273 6	—	—	—

3.2.2 石林县景观生态风险空间分异特征

通过公式（1）对研究区每个评价单元的中心点赋 *ERI* 值，利用克里金插值法揭示研究区景观生态风险分布特征（图 3）。结合研究区现状及 3 个时期的 *ERI* 指数，利用 Jenks 自然断点法将研究区的 *ERI* 划分为 5 个生态风险等级：高生态风险区（$ERI \geqslant 0.15$）、较高生态风险区（$0.13 < ERI < 0.15$）、中生态风险区（$0.09 < ERI < 0.13$）、较低生态风险区（$0.05 < ERI < 0.09$）、低生态风险区（$ERI \leqslant 0.05$）。石林县景观生态风险异质性明显，呈现中间高四周低的景观生态风险分布态势。具体来看，石林县高景观风险面积占比较大，主要集中分布在石林景区、圭山景区以及研究区内的部分耕地，2010 年石林街道办事处东部高风险区面积有所减少，主要向较高风险区转化；2020 年西街口街道办事处西部高风险面积减少，主要转为较高风险区。高风险呈现为石林景区、圭山景区地区集中分布，其他区域零星分布的空间特征。较高以及中景观生态风险区主要分布在高风险区四周及内部，说明景观生态风险等级具有空间过度的特征；低和较低生态风险等级呈现在研究区的四周与中风险等级景观交错分布的格局。从土地利用与景观生态风险的空间分布关系来看，耕地、林地大多以高、较高风险等级为主，草地、不透水面分布区以中风险等级为主，该现象说明土地利用空间结构和景观生态风险格局具有同步性和一致性。

由图 3 可知，2000 年研究区较高、高景观生态风险面积比例分别为 14. 46% 和 66. 55%，占研究区总面积的 81. 01%，其中高景观生态风险区主要分布在石林景区、圭山景区以及研究区内的耕地。在研究时段内石林县以农耕为主，受人为活动影响较大。与此同时，当地发展旅游业，2 个景区内的人工开发使得原有较为完整的景观变得破碎，造成石林县局部地区景观生态风险增加。

2010 年，石林县研究区高景观生态风险区面积减少，较高风险区面积增加，但研究区南部部分地区风险指数增加，由低风险、中风险转为较低风险区以及较高风险区。在研究时段内，石林县城市开发边界向南扩张，加之北部扩大了生态保护红线的范围，此举措虽对研究区北部的景观生态风险有所改善，但却加重了研究区南部的生态风险程度。在此期间，由于部分地区农民对林地和草地的开垦，使南部较为脆弱的林地草地景观遭到破坏，从而增加了南部景观生态风险。

2020 年，石林县较高、高景观生态风险区的面积比例分别为 26. 25% 和 51. 93%，占研究区总面积的 78. 18%，相比于 2000 年呈明显的下降趋势。在这 10 年间，石林县大力发展第三产业和环境治理工程，县内的城市不透水面面积虽增加，但向有序方向转变，在此类举措下，研究区受人为干扰后易损度降低，且研究区大力进行生态文明建设加强环境保护，开展植树造林、封山育林育草和石漠化治理等项目，森林覆盖率得到提高，同时对传统产业进行生态化改造，大力发展环保节能等战略性新兴产业，生态环境得到明显优化，进而使研究区中部生态风险程度降低。

综上，3 个时期石林县景观生态风险格局以高、较高生态风险区占主导地位，虽然这 2 类风险区面积比例呈缩小趋势，但仍是影响景观生态安全不容忽视的客观事实；中、较低生态风险区面积略有增加，是影响石林县景观生态的安全隐患区域。

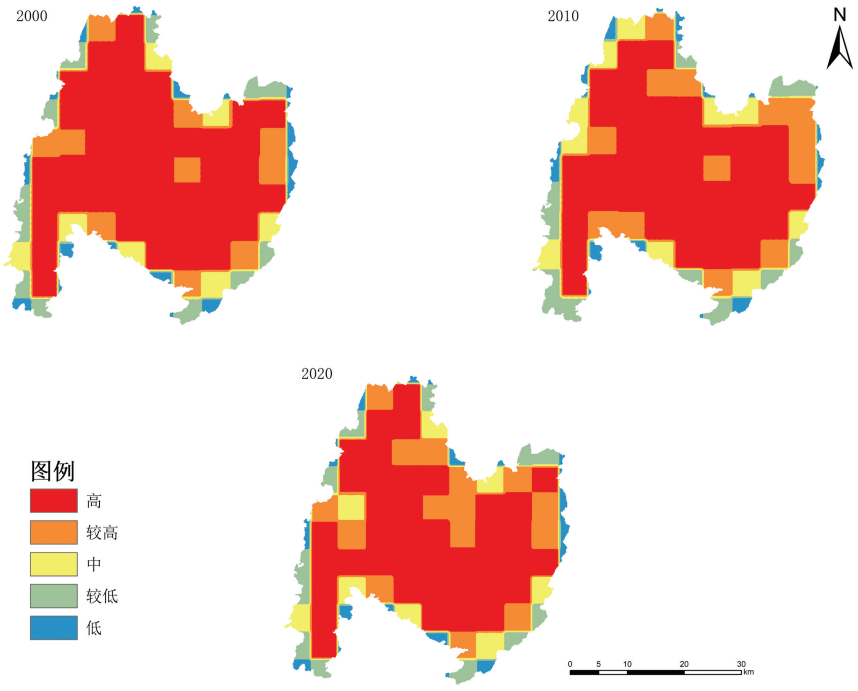


图 3　2000—2020 年生态风险空间分布

4　讨论

景观生态风险评估是基于景观格局及其组成要素的变化特征和演变规律，揭示当区域遭受人类活动或自然灾害等外部压力时对生态系统所产生的负面影响的一种评价方法。景观生态风险评估有利于确定城市的发展规模以及保障区域的可持续发展。本研究表明，20 年（2000—2020 年）石林县景观生态风险变化较大，呈现先增长后降低的趋势，生态安全状态总体有转好趋势。从景观类型角度出发，不透水面的面积逐年增加，该景观类型的生态风险值在 2010 年以前呈升高趋势，说明不透水面扩张导致景观生态风险值上升，与王洁团队[16]的研究结果一致；但 2010—2020 年，景观生态风险值呈现降低趋势，映射出不透水面与生态风险呈现负相关性，该结论与达瓦扎喜[17]的研究结果相同，说明政府在推进城市化进程中，重视城市绿地建设的举措有很大成效，因此不透水面在面积扩大的同时，生态风险值降低。近 20 年水体的风险指数均较高，说明人类活动强度越高对区域生态风险的影响越明显，这与易武英[18]等对喀斯特地区的景观风险评估结果趋同，即湿地资源较为丰富的区域更容易受到破坏，因此建议石林县域应提高对湿地景观的保护。从生态风险空间分布角度出发，石林县景观生态风险分布格局呈现“中间高，边缘低”的分布规律，这与刘可暄[19]等人的研究结果相悖，其主要原因为密云水库流域边缘的主要景观是水域及耕地，而石林县县域边缘为海拔较高的林地，因此在空间分布上呈现“中间高四周低”的分布规律。

20 年间虽然高风险区面积有所减少，但占比仍较大。结合前人研究结果及当地出台政策可知，研究区北部划定生态保护红线后生态所有改善，但中部及南部却负担加重，以后应对林地、耕地、水体进一步重点治理。研究区中部及南部为高景观风险聚集地，主要是因为自然因素和人类的过度干扰造成。综上，从生态环境的角度出发，提出以下优化建议：1）在生态风险程度较高的地方划定生态保护红线将其列为严格管控区，进行生态管理工程建设，严格执行生态环境保护政策。2）圭山景区及石林景区作为重点维稳区，加强自然保护区核心区的管护，禁止核心区开展旅游活动，在保护好优势景观资源的基础上妥善处理生态保护与经济建设之间的关系。3）在土地利用开发过程中，合理规划耕地面积，调节农业产

业结构，推广耕地集约化机械化经营，减轻耕地破碎化，坚持生态优先的原则。

李武等[20]、王鹏等[21]基于土地利用类型分析研究区生态风险的研究表明，通过土地利用时空演化规律揭示区域生态风险的研究是科学合理的，但在生态脆弱性环节，直接用土地利用类型赋权重具有较强的主观性，因此在后面的研究中关注景观生态风险变化的驱动因素，适时引入“生产-生活-生态”三生空间的功能演化应是今后的探索方向。

5 结论

1）2000—2020 年，不透水面变化较为显著，石林县用地需求激增导致研究区内耕地向不透水面流入 31.29 km^2，人类活动由研究区北部向中部及南部转移。草地、林地及水域的面积变化虽不大，但呈下降趋势。

2）2000—2020 年，各用地类型的综合景观生态风险呈先增长后降低的倒“V”型变化，耕地、林地和草地的生态风险变化对石林县景观生态风险变化影响较大；水体属于高风险景观类型，对优化石林县综合景观生态潜力较大。生态风险在整体空间分布上，较高、高生态风险占主导地位，2020 年，虽然面积比例和 2010 年及 2000 年相比较小，但仍是影响生态安全的客观事实，应引起重视。

3）2000 年，研究区以高生态风险区为主，到 2020 年研究区北部高生态风险区有明显下降趋势，但研究区中部及南部情况仍不容乐观。

参考文献

[1]李旭芳,翁飞帆,丁铮.基于土地利用时空格局演变的新乡市生态风险分析[J].中国城市林业,2023,21(1):131-136.

[2]曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.

[3]孟庆香,张莉坤,位贺杰,等.基于土地利用/覆被变化的伊河流域生态系统服务供需风险时空演变[J].生态学报,2022,42(5):2033-2049.

[4]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.

[5]左岍,周勇,李晴,等.基于最优尺度的鄂西南山区景观生态风险时空变化特征[J].生态学杂志,2023,42(5):1186-1196.

[6]乔斌,祝存兄,曹晓云,等.格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J].应用生态学报,2020,31(5):1660-1672.

[7]王杉,吕寅超,林静雅,等.苏州游湖地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].中国城市林业,2022,20(2):125-130.

[8]乔斌,颜玉倩,张婷华,等.基于土地利用变化的西宁市景观生态风险识别及优化策略[J].生态学杂志,2023,42(8):2020-2031.

[9]李虹睿.娄烦县土地利用景观格局演变及其生态风险评价[D].太原:山西大学,2019.

[10]王超,常勇,侯西勇,等.基于土地利用格局变化的胶东半岛生境质量时空演变特征研究[J].地球信息科学学报,2021,23(10):1809-1822.

[11]魏靖阳,於冉,魏露,等.基于土地利用格局的合肥市景观生态风险评价[J].云南农业大学学报(社会科学),2022,16(6):101-109.

[12]LIU D,CHEN H,ZHANG M,et al.Analysis ofspatial-temporal Distribution of landscape ecological risk in ecologically vulnerable areas and its terrain gradient:a case study of Mizhi County of Shaanxi province[J].Research of Soil and Water Conservation,2019,7(10):3171-3178.

[13]陈心曲,丁忠义,杨俊等.沛北矿城复合区景观生态风险评价及驱动力分析[J].生态学杂志,2022,41(9):1796-1803.

[14]杨伶,邓敏,王金龙等.近 40 年来洞庭湖流域土地利用及生态风险时空演变分析[J].生态学报,2021,41(10):3929-3939.

[15]白立敏,修春亮,冯兴华.基于土地利用变化的长春市生态风险评价[J].生态科学,2019,38(3):26-35.

[16]王洁,摆万奇,田国行.青藏高原景观生态风险的时空特征[J].资源科学,2020,42(9):1739-1749.

[17]达伍扎喜,王静,张志明,等.高原河谷城镇化对植被覆盖度的影响[J].生态学报,2020,40(17):6025-6036.

[18]易武英,周文龙,苏维词,等.典型喀斯特峰丛洼地土地利用生态风险评价:以平塘县为例[J].湖北农业科学,2017,56(4):797-800.

[19]刘可暄,王冬梅,魏源送,等.密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J].生态学报,2023,43(1):105-117.

[20]李武,李丽,吴巩胜,等.白马雪山国家级自然保护区景观动态变化研究[J].海南师范大学学报(自然科学版),2015,28(3):298-302,320.

[21]王鹏,王亚娟,刘小鹏,等.干旱地区生态移民土地利用变化生态风险:以宁夏红寺堡区为例[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):58-65.