基于景观格局的高原湖泊流域生态风险及其驱动因子

马 品 郭丽琴 王恒玉 冉 菊

（云南省地图院，昆明 650100）

摘要：【目的】识别滇池流域景观生态风险时空演变规律及其驱动因素，为高原湖泊流域生态环境治理和高质量发展提供参考。【方法】基于滇池流域 2010—2022 年 3 期土地利用现状数据，综合运用转移矩阵、热点分析、地理探测器方法，分析各地类间的流转情况；构建滇池流域景观生态风险评价模型，探究其时空演变特征、时空异质性以及空间分异的主要驱动因子。【结果】1）滇池流域优势地类是林地和建设用地，各地类间的转移主要发生在林地、耕地和建设用地，且受优势地类型主导的现象较明显，破碎化程度有所降低，流域整体景观抗干扰能力较强。2）2010—2022 年滇池流域景观生态风险持续性降低，整体景观生态持续向好，其中未利用地、草地和耕地生态风险持续上升；建设用地、林地和水域生态风险微小。3）景观生态风险具有较强的空间聚集特征，自然因素是主要因素，其中水源涵养量是主导驱动因子；多因子间的交互作用对滇池流域整体景观生态风险空间格局具有增强效果。4）景观生态风险值和冷热点分析也具有空间异质性，根据水源涵养差异性可将滇池流域划分为一级、二级、三级管控区。【结论】滇池流域景观生态风险持续降低主要与长期实施的生态修复治理和保护有直接关系，生态风险管控分区应高度重视滇池流域内土地用途管制。

关键词：土地利用变化；景观格局；生态风险；地理探测；高原湖泊流域

DOI：10.12169/zgcsly.2025.04.24.0006

Ecological Risk of Plateau Lake Basins and Their Driving Factors Based on Landscape Pattern Analysis

Ma Pin Guo Liqin Wang Hengyu Ran Ju

（Yunnan Provincial Mapping Institute, Kunming 650100, China）

Abstract：【Objective】This study aims to identify the spatiotemporal evolution patterns of landscape ecological risks and their driving factors in the Dianchi Lake Basin, and provide references for ecological environment governance and high-quality development of the plateau lake basin.【Method】Using three periods of land use data in the Dianchi Lake Basin from 2010 to 2022, we comprehensively apply transfer matrices, hotspot analysis, and geographical detector methods to analyze the transfer among various land uses. A landscape ecological risk assessment model is constructed for the Dianchi Lake Basin to explore its spatiotemporal evolution characteristics, spatiotemporal heterogeneity, and main driving factors to spatial differentiation.【Result】1）The dominant land uses in the Dianchi Lake Basin were forest land and construction land. The transfer among land uses mainly occurs among forest land, cultivated land, and construction land. Dominant land uses are more obviously observed, with decreased fragmentation, and the overall landscape of the basin has strong anti-disturbance capability.; 2）From 2010 to 2022, the landscape ecological risk in the Dianchi Lake Basin has continuously decreased, and the overall landscape eco-environment has improved. Among them, the ecological risks of unused land, grassland, and

收稿日期：2025-04-24

* 基金项目：“云南省 2025 年土地卫片执法省级技术支持服务”（YNZC2025-G3-00533-YNZZ-0010）

第一作者：马品，男，1980 年生，博士，正高级工程师，研究方向为空间信息技术应用。

通信作者：郭丽琴，女，1992 年生，硕士，工程师，研究方向为 GIS 与土地利用。E-mail：1171789422@qq.com

cultivated land have continued to rise, while the ecological risks facing construction land, forest land, and water bodies are minimal; 3) Landscape ecological risk has strong spatial aggregation characteristics, and natural factors are the main factors. Among them, water conservation is the dominant driving factor, and the interaction among multiple factors has an enhancing effect on the spatial pattern of overall landscape ecological risk in the Dianchi Lake Basin; and 4) The landscape ecological risk values and cold-hot spot analysis also exhibit spatial heterogeneity. Based on the differences in water conservation, the Dianchi Lake Basin is divided into first-level, second-level, and third-level control zones.【Conclusion】The continuous decrease in landscape ecological risk in the Dianchi Lake Basin is directly related to long-term ecological restoration and protection. The ecological risk control zoning should attach great importance to land use control in the Dianchi Lake Basin.

Keywords: land use change; landscape pattern; ecological risk; geographic exploration; plateau lake basin

生态风险是指景观内部本身潜在脆弱性和敏感性，加之在自然或人类活动等外界风险干扰下生态系统的组分、结构、功能、布局等可能被破坏以及产生的有关损失[1-2]。生态风险评价已成为支持生态系统管理和衡量区域生态系统可持续发展的有效手段[3]。作为地表景观宏观表征方式的土地系统处于潜在高风险上升阶段[4]。土地利用变化能 清晰反映自然资源和生态过程的变化情况，揭示人类活动和生态环境的相互作用，直接影响景观生态风险的时空动态演变特征[5]。

近年基于区域土地利用变化开展景观生态风险评价的学术研究颇多，主要采用景观指数法探析行政区[6]、重点生态区[7-10]等尺度的生态风险，深入剖析生态系统的结构组成和格局演变与生态风险之间的内在时空相关性。滇池流域位于云贵高原中部，作为高原湖泊流域的典型代表，在水土保持、气候调节和生物多样性保护等方面发挥着重要的作用。随着滇池流域城市化进程加速推进，“退耕还林还草”和“耕地占补平衡”等政策的落实，各地类间发生较大量的转化，区域经济发展与环境承载力的矛盾仍尖锐。当前已有不少学者对滇池流域生态系统、生态敏感性或脆弱性及其影响因等方面进行了深入研究[11-17]，但针对滇池流域的景观生态风险研究仍显不足，缺乏系统的时空分析和驱动因子探测；部分研究在评价景观生态风险时，采用的方法较为单一，难以全面揭示景观生态风险的复杂性和多变性；对景观生态风险驱动因子的分析不够深入，尤其是缺乏多因子交互作用的探讨，难以准确揭示景观生态风险的形成机制。

随着云南省“生态文明建设排头兵”和“建设中国最美丽省份”战略、国家重点流域治理规划的深入推进，对维护高原湖泊流域生态系统健康、安全和高质量发展有了新展望，进而开展滇池流域景观生态风险评价具有现实意义。

本研究以景观格局为视角，综合运用多种方法，对滇池流域景观生态风险进行系统的时空分析和驱动因子探测，分析景观格局对景观生态风险的影响；同时关注不同地类在景观生态风险中的贡献，通过地理探测器，定量识别影响滇池流域景观生态风险空间分异的主导驱动因子及其交互作用，为制定差异化的生态风险管控措施提供科学依据，为高原湖泊流域综合治理与生态保护提供指导。

1　研究区概况

研究区位于云南省中东部（102°29′—103°1′E，24°28′—25°28′N），总面积 2 888.30 km^2，属于亚热带高原季风气候，年温差较小，干、湿季分明；区域内地势起伏和缓，山地和坝子交错分布；研究区面积占全省 0.78%，人口和 GDP 占比分别为 18%和 23%，是昆明市经济社会最发达、人口最多的区域。

2　研究方法

2.1　数据来源及处理

选取数据如表 1 所示，将其统一在 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_35 投影坐标系并重采样至 500 m 分辨率，数据处理软件为 ArcGIS 11.3。将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 大类。

表 1 主要数据说明及获取来源

数据名称	年份	数据格式(精度)	来源
DEM	2022	栅格(30 m)	地理空间数据云
滇池流域界限	2022	矢量	昆明市自然资源与规划局
年均降水、植被覆盖度、水源涵养量、土壤保持	2022	栅格 (1 km)	地球资源数据云
年均气温	2022	栅格 (500 m)	云南省气候精细化推演数据
土壤有机质含量	2022	栅格 (500 m)	云南省第二次土壤普查成果
农村居民点、交通道路网	2022	矢量	国家基础地理信息中心
人口密度	2022	栅格 (100 m)	WorldPop 平台人口密度数据
污染源	2022	矢量	云南省第二次全国污染源普查成果、云南省养殖备案数据、自然村卫生公厕数据
地质灾害点	2022	矢量	云南省地质灾害隐患点
土地利用数据	2010、2016、2022	栅格(500 m)	云南省国土变更调查成果库

2.2 土地动态度分析

单一土地动态度（SLUDD）和综合土地动态度（CLUDD）表征研究区在研究时期内各土地利用类型变化的速度和强度[18-19]。

2.3 土地转移分析

转移矩阵和土地转移状态指数（LTSI）能反映研究区在研究时期内土地利用转移情况，揭示土地利用变化趋势[18-19]。

2.4 景观生态风险评价模型构建

景观生态风险是外部干扰力和内部脆弱性综合作用的结果，采用景观格局指数可以定量分析且快速识别土地利用异质性所产生的干扰和生态系统自身的脆弱程度[20]。选取景观破碎度（C）、景观分离度（N）、景观优势度（D）、景观损失度（R）、景观干扰度（E）及景观脆弱度（F）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构建滇池流域景观生态风险评价模型，实现滇池流域景观生态风险的时空量化表达[21-27]。

2.5 景观生态风险空间热点分析

采用目前应用最广泛的局部空间自相关与热点分析方法研究滇池流域景观生态风险空间聚集特征。利用 Getis-Ord Gi * 功能进行统计，生成高值和低值要素在空间上发生聚集位置的空间表现，热点表示高值要素的显著聚集区，冷点表示低值要素的显著聚集区[28]。

2.6 驱动力因子分析

利用地理探测器揭示影响区域生态环境变化的潜在驱动因子及其内在联系。因子探测用 q 值来度量，探测出各类型驱动因子能多大程度上解释滇池流域景观生态风险的空间分异。本研究结合流域特点及前人研究对影响高原湖泊流域景观格局的因子进行总结归纳，影响因子主要集中在高程、坡度、坡向、地形起伏度、年均气温、年均降水、植被覆盖度、土壤有机质含量、土壤保持、水源涵养量和地质灾害点 11 个自然因子和人口密度、城市化发育水平（按照单位面积内建筑用地所占比例计算[29]）、距居民点距离、距道路距离、污染源 5 个人为因子。交互探测功能可以辨识出不同驱动因子之间的交互作用，评估出因子之间共同作用时是否会增加或削弱对景观生态风险的解释力[30]。q 值取值范围介于 0~1，取值越接近 1，该因子对滇池流域的空间分异性（ERI）的影响越大。

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (1)$$

式（1）中：$h = 1, 2 \cdots L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层；N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数；σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。

3 结果与分析

3.1 土地利用演变特征

由表 2 可知，12 年间流域内林地、建设用地以及水域面积总体呈增长趋势，SLUDD 分别为 0.025 2%、0.040 5%和 0.000 3%；耕地、草地以及未利用地呈下降趋势，SLUDD 分别为 −0.052%、−0.080 1%和−0.131 7%，其中未利用地动态度最大；近 6 年滇池流域的综合动态度最大，CLUDD 为 0.042 7%，表明这时间段内各地类的转化程度较为剧烈。

表 2　2010—2022 年滇池流域土地利用动态度和转移指数

土地利用类型	2010—2016 年			2016—2022 年			2010—2022 年		
	LTSI	SLUDD/%	CLUDD/%	LTSI	SLUDD/%	CLUDD/%	LTSI	SLUDD/%	CLUDD/%
耕地	−0.994 0	−0.018 1	0.006 5	−0.382 3	−0.038 0	0.038 6	−0.508 3	−0.052 0	0.042 7
林地	−1.000 0	−0.004 9		0.441 4	0.031 0		0.352 5	0.025 2	
草地	−1.000 0	−0.006 8		−0.387 6	−0.076 4		−0.411 5	−0.080 1	
水域	−0.943 5	−0.002 1		0.156 1	0.002 4		0.017 6	0.000 3	
建设用地	0.999 8	0.034 4		0.081 2	0.005 0		0.437 0	0.040 5	
未利用地	−1.000 0	−0.009 8		−0.671 7	−0.129 5		−0.688 5	−0.131 7	

流域土地利用转移结果（图 1）显示：滇池流域在 2010—2022 年耕地主要流向林地和建设用地，林地主要流向耕地和建设用地，草地主要流向林地；水域流出转为其他地类面积较小，最主要是转向建设用地；建设用地主要流向林地和草地；未利用地主要流向林地。LTSI 变化趋势与 SLUDD 保持一致，其中建设用地和林地的土地转移状态指数较大，表明建设用地和林地的面积呈现快速增长态势，这分别与城市化进程加快，环境保护、生态文明建设国家政策的实施密切相关。

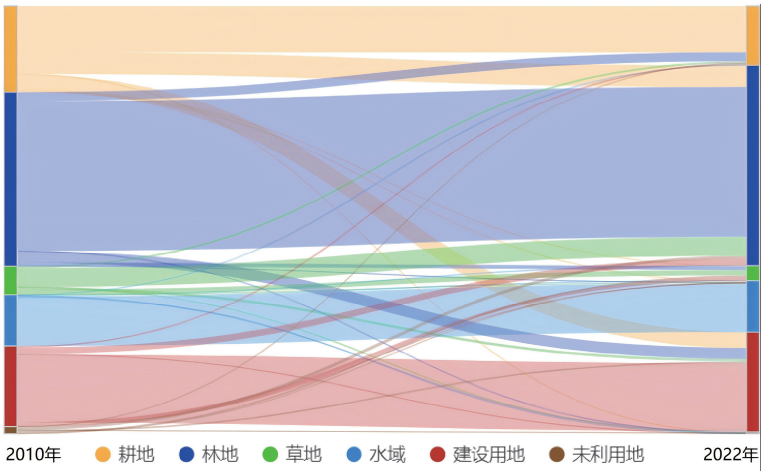


图 1　2010—2022 年滇池流域土地利用的双向转换模式

3.2　滇池流域景观生态风险时空变化

采用 Jenks 自然断点法将生态风险划分成 5 个等级：低、较低、中等、较高、高，形成滇池流域景观生态风险等级时空分布图（图 2）。

时间序列结果（图 2）显示：2010—2022 年滇池流域景观生态风险持续降低，近 6 年减幅最大。高、较高和低风险区面积逐年减少，较低风险区面积持续增长，只有中等风险区面积是先减少后增加。

空间分布结果（图 2）显示：2010—2022 年滇池景观生态在高风险区分布规律差异较大，而其他 4 类风险区差异较小。其中，中等风险及以下区域主要分布在晋城镇、阿子营街道、滇源街道、大板桥街道、上蒜镇、昆阳街道等地区，主要覆盖的地类是林地和建设用地；高风险区零散分布不集中，主要地类是未利用地，这与研究区内城市建设开发需求直接相关（主要为滇池沿线旅游度假区旅游地产板块的开发），区域内植被稀疏，生态环境脆弱，生态保护迫在眉睫；较高风险区分布有一定集聚效应，具体地址分布在滇池、晋城镇中部、上蒜镇南部、滇源街道东北部、昆阳街道西部、六街镇北部、宝峰街道北部和东部、大板桥街道中部等地区，主要覆盖的地类为水域和草地。

2010—2022 年滇池流域景观生态风险上升区、下降区呈现交错式分布格局（图 3a）：上升区主要分布在滇池沿岸、流域东北部和西南部；下降区分布广泛，但在滇池中南部出现集中分布特点。2010—2016 年分布格局（图 3b）显示：上升区和下降区主要集中分布于流域中部，而 2016—2022 年分布格局（图 3c）上升区和下降区大范围扩张，在流域范围内发散式分布。

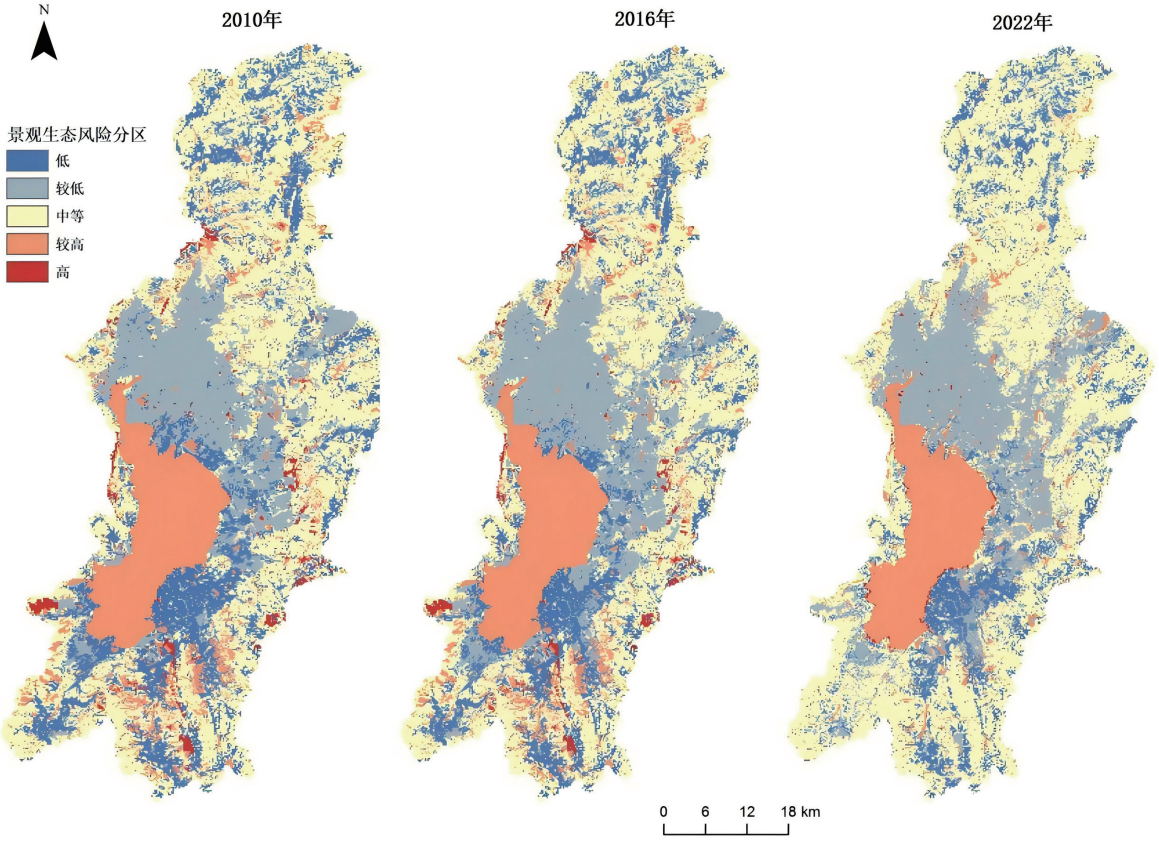


图 2 2010—2022 年滇池流域景观生态风险等级时空分布

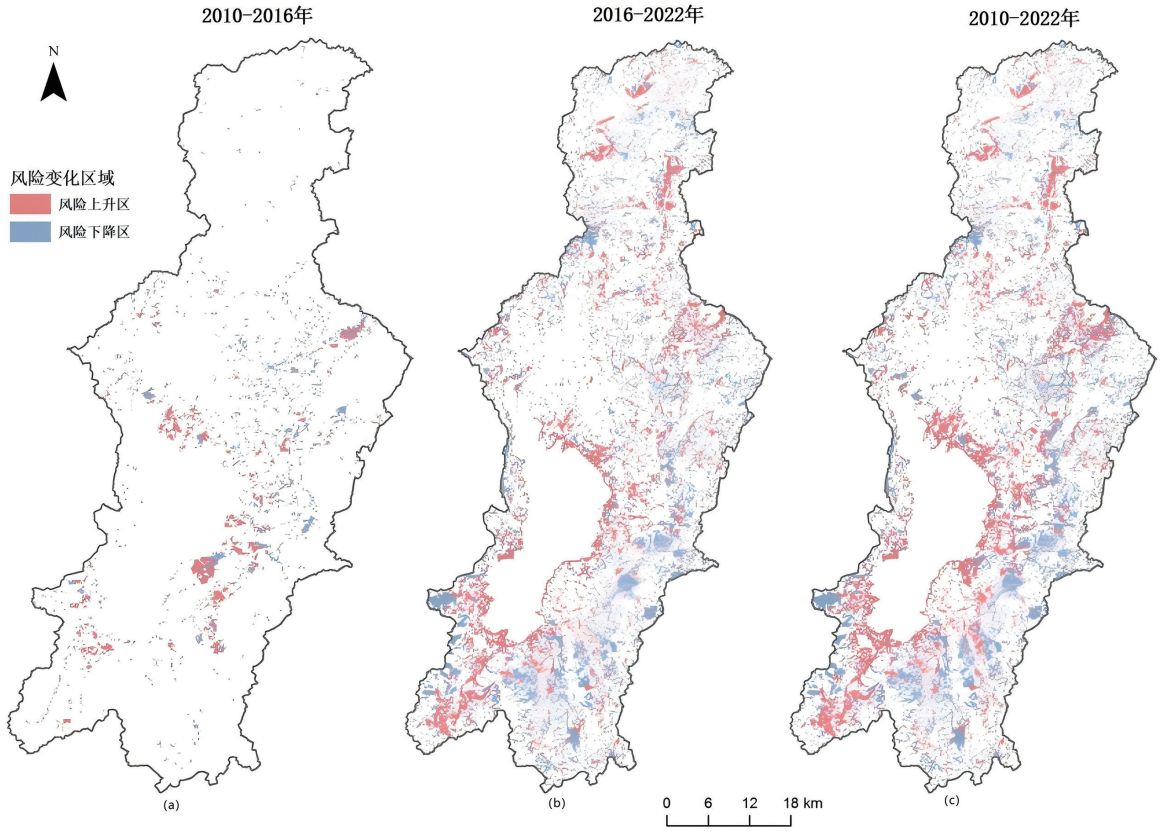


图 3 2010—2022 年滇池流域景观生态风险变化空间分布

滇池流域 3 期地类景观损失度（图 4）显示：草地、耕地和未利用地景观损失度持续性增加，其中未利用地处于较高水平，其对应的景观生态风险也较大；建设用地、林地和水域景观损失度变化小，其对应的景观生态风险也较小。

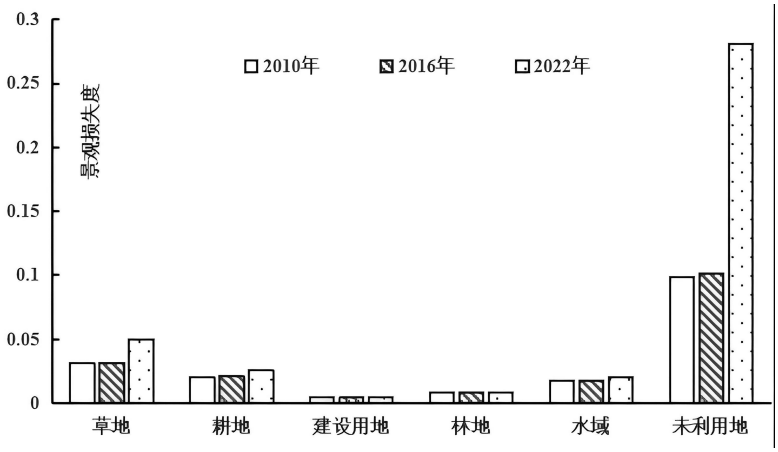


图 4　2010—2022 年滇池流域各地类的景观损失度

3.3　滇池流域景观生态风险时空异质性及其驱动因子

图 5 显示：滇池流域在研究的 12 年间，景观生态风险的冷热点区域空间分布存在一定的差异性，但在整体上具备重叠性的特点。热点区域主要分布于滇池流域的中部、南部及西北部区域，主要地类是未利用地和水域，分布区域出现相对集中成片的特点，所以景观脆弱度较高；冷点区域主要分布滇池流域的东部和北部区域，主要地类是林地和建设用地，这两种稳定性强，所以其景观脆弱度较低，具备较强的生态系统稳定性；不显著区域不具备明显的生态风险高值聚集效应，且多集中分布在冷、热点之间，过渡地带不具备较强稳定性，存在一定生态风险。

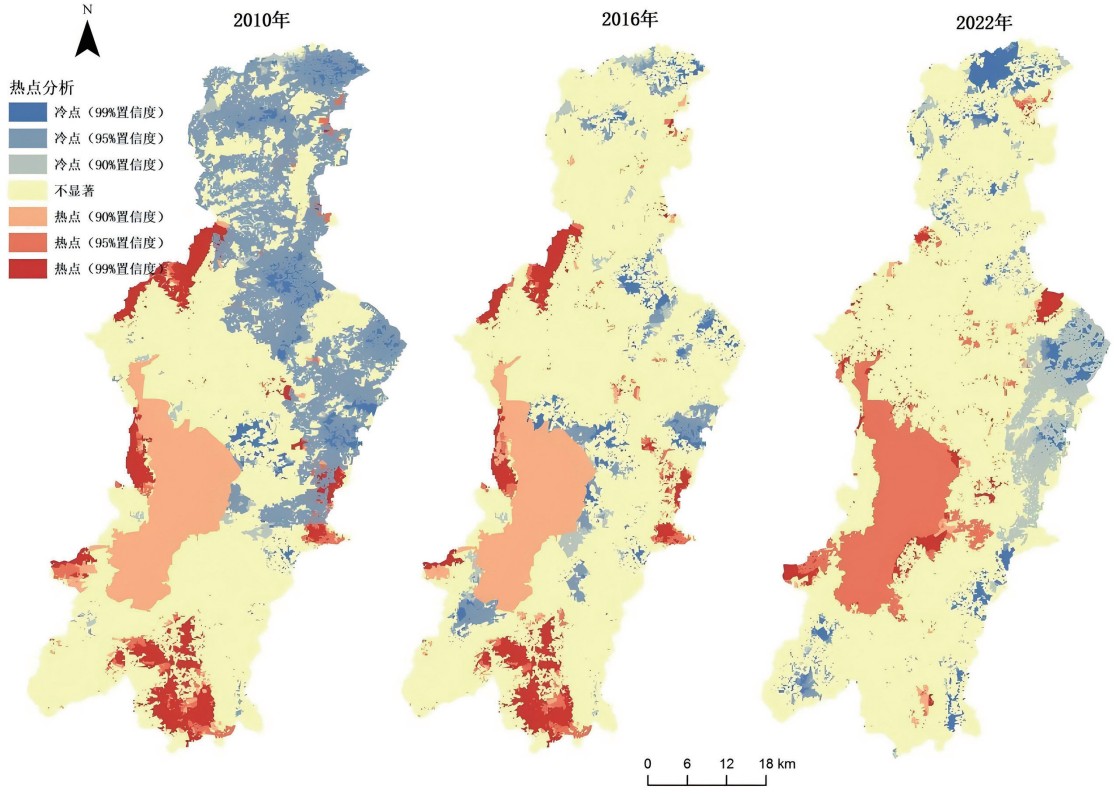


图 5　滇池流域景观生态风险冷热点分布

由表 3 可知，各因子的贡献率排序为 $X_{10}>X_1>X_5>X_4>X_7>X_2>X_{12}>X_9>X_6>X_{13}>X_{14}>X_{16}>X_8>X_{11}>X_{15}>X_3$，这 16 个自然和人为因素均存在显著影响（$P<0.05$），其中水源涵养量是影响滇池流域生态风险分布格局差异的主导因子，表征该地区水量平衡。整体上以自然因素影响为主，人为因素为辅，其中人为因素中的人口密度影响较大，其余因素影响微弱。

表 3 滇池流域景观生态风险空间分异因子探测

影响因素	驱动因子	代码	q	*P*	排序
自然因素	高程	X_1	0.145 9	0.00	2
	坡度	X_2	0.106 0	0.00	6
	坡向	X_3	0.002 8	0.00	16
	地形起伏度	X_4	0.110 9	0.00	4
	年均气温	X_5	0.130 9	0.00	3
	年均降水	X_6	0.071 8	0.00	9
	植被覆盖度	X_7	0.110 0	0.00	5
	土壤有机质含量	X_8	0.009 3	0.00	13
	土壤保持	X_9	0.076 0	0.00	8
	水源涵养量	X_{10}	0.158 4	0.00	1
	地质灾害点	X_{11}	0.008 9	0.00	14
人为因素	人口密度	X_{12}	0.101 6	0.00	7
	城市化发育水平	X_{13}	0.057 7	0.00	10
	距居民点距离	X_{14}	0.029 5	0.00	11
	距道路距离	X_{15}	0.008 8	0.00	15
	污染源	X_{16}	0.015 6	0.00	12

图 6 显示：X_1 和 X_{10} 因子对滇池流域景观生态风险空间分布格局的解释力呈现出双因子增强的关系；X_5 和 X_{16} 因子对滇池流域景观生态风险空间分布格局的解释力呈现非线性增强关系；任意两种因子对滇池景观生态风险空间格局的交互作用都要大于单一因子的影响，表现方式为双因子增强或非线性增强。综上，影响滇池流域景观生态风险的空间格局分异性的原因是由多因子交互、协同作用的共同结果，自然和人为因素相互作用形成解释力的叠加增强效应，共同决定滇池流域空间分异格局。

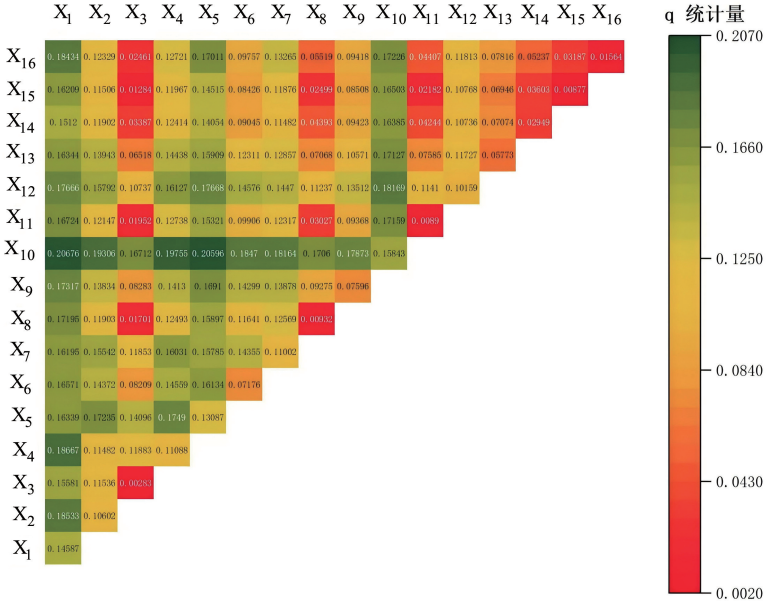


图 6 滇池流域景观生态风险空间分异交互探测结果

3.4 优化建议

1）将滇池流域划分 3 个区域。强水源涵养能力区（>5 500 m^3）划分为一级管控区，中等水源涵养能力区（2 000～5 500 m^3）划分为二级管控区，弱水源涵养能力区（<2 000 m^3）划分为三级管控区（图 7）。

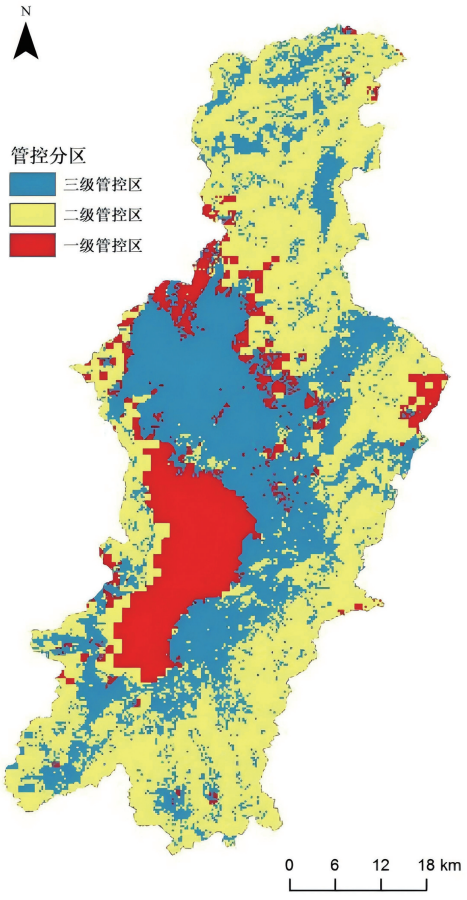


图 7　滇池流域生态风险管控区

2）坚持以自然恢复优先、自然恢复与人工修复相结合的方式。一级管控区以滇池为核心，滇池环线（距离滇池 0~100 m）生态保护与修复为重点，实施强制性保护政策，严禁开发；二级管控区以水源保护区和国家、省级林区为核心，加强区域内生物多样性保护；三级管控区以耕地保护（粮仓）和城镇人居环境提升为核心，控制城镇点面源污染为重点，提升生态系统稳定性。

3）重点关注流域内水土流失区、面山“五采区”等生态脆弱地区。考虑到滇池流域近 10 年年均气温和蒸散发呈上升趋势[31]，很大程度上降低了区域内林草地、河湖的景观连通性，加剧了滇池流域的景观脆弱度，势必会增加滇池流域景观生态风险，未来研究中应重点关注流域内水土流失区、面山“五采区”等生态脆弱地区。

4　讨论

4.1　土地利用与景观生态风险演变规律

景观生态风险评价有利于确定城市的发展规模以及统筹生态保护与可持续发展。本研究结果显示，研究年限内滇池流域景观生态风险整体处于持续降低趋势，其中 2016 以后减幅最大，原因在于 2016 年开始的区域内严格执行的退耕还林还草还水政策，与国家政策导向保持一致。空间分布结果显示滇池流域主要地类是林地和建设用地，这两类地类有良好的空间连通性和聚集性，稳定性强，抗外界干扰能力强，生态风险较低，与王涛等[23]研究结果一致。风险上升区主要分布在滇池沿岸，12 年高强度的滇池沿线人类活动干扰（高强度的旅游度假区地产开发）导致生态风险持续上升，与高宾等[8]研究结果一致。地类间景观损失度结果显示耕地和未利用地景观损失度持续性增长，其中未利用地位于较高位置，原因在于昆明城区往外扩张且沿着滇池沿线不断侵占草地、耕地和未利用地，主要分布在西山区、官渡区、呈贡区和晋宁区的滇池沿线，与王敏等[20]研究结果相悖，其主要原因为张掖绿洲乡镇边缘的主要景观是水域及耕地，而滇池流域边缘为耕地和未利用地，这也是滇池沿线耕地和未利用地景观损失度持续增加的原因。

4.2　驱动力因子对区域景观生态风险演化规律

影响区域景观生态风险格局是自然因素与人为因素多维耦合的结果。滇池流域景观生态风险的冷热点区域空间分布呈现出一定程度差异性，但在整体上具有重叠特性，热点区域分布呈现相对集中成片特点，景观脆弱度较高，这与王佳恒等[12]研究结果一致，因此在热点区域应加强滇池沿线生态保护。探测结果显示自然因素影响为主，人为因素为辅，且任意两种因子对滇池景观生态风险空间格局的交互作用都要大于单一因子的影响，这与徐灵芝等[17]研究结果一致。

5　结论

2010—2022 年滇池流域地类间转移主要发生在林地、耕地和建设用地，其中林地和建设用地是研究区主要地类，在空间上呈现出较为集中分布的特点，有助于提高滇池流域景观的连通性和稳定性。

2010—2022 年滇池流域景观生态风险持续性降低，这与长期实施的生态修复治理和保护有直

接关系。

滇池流域景观生态风险空间异质性较为明显，有较强的空间聚集特性。生态风险管控分区应高度重视滇池流域内土地用途管制。

参考文献

[1]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.

[2]GONG J,YANG J X,TANG WW.Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(11):14192-14215.

[3]PENG J,ZONG M L,HU Y N,et al.Assessing landscape ecological risk in a mining city:a case study in Liaoyuan City,China[J].Sustainability,2015,7(7):8312-8334.

[4]何春阳,张金茜,刘志锋,等.1990—2018年土地利用/覆盖变化研究的特征和进展[J].地理学报,2021,76(11):2730-2748.

[5]彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.

[6]YANG Y P,CHEN JJ,LAN Y P,et al.Landscape pattern and ecological risk assessment in Guangxi based on land use change[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(3):1595.

[7]QU Y B,ZONG H N,SU D S,et al.Land use change and its impact on landscape ecological risk in typical areas of the Yellow River Basin in China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(21):11301.

[8]高宾,李小玉,李志刚,等.基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J].生态学报,2011,31(12):3441-3450.

[9]万慧琳,王赛鸽,陈彬,等.三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J].生态学报,2022,42(16):6595-6606.

[10]于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.

[11]徐慧琳,延相东,王爱芸.基于土地利用变化的滇池流域生态系统服务价值评估与空间管控研究[J].西南林业大学学报,2025,45(3):102-109.

[12]王佳恒,颜蔚,段学军,等.基于多元耦合模型的流域生态修复分区与用地模拟评估:以滇池流域为例[J].中国科学院大学学报(中英文),2025,42(1):61-73.

[13]陈德超,范金鼎,赵海霞,等.滇池流域生态系统完整性变化及其驱动机理实证研究[J].生态经济,2024,40(4):185-193,205.

[14]ZHANG S H,ZHONG Q L,CHENG D L,et al Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region[J].Ecological Indicators,2022,136:108642.

[15]严长安,杨汝兰,付潇华,等.土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2023,43(15):6194-6202.

[16]王启名,杨昆,李立晓,等.滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析[J].生态学报,2023,43(12):4876-4891.

[17]徐灵芝,潘继征,李勇,等.1980—2020年滇池生态脆弱性评价及主要驱动因子[J].湖泊科学,2023,35(5):1682-1693.

[18]HAN Z,SONG W,DENG X Z,et al.Responses of ecosystem service to land use change in Qinghai Province[J].Energies,2016,9(4):303.

[19]余新晓,张晓明,牛丽丽,等.黄土高原流域土地利用/覆被动态演变及驱动力分析[J].农业工程学报,2009,25(7):219-225.

[20]王敏,胡守庚,张绪冰,等.干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析:以张掖绿洲乡镇为例[J].生态学报,2022,42(14):5812-5824.

[21]徐嵩,季鹏云,张戈.多情景模拟下自然保护区景观生态风险预测及优化[J].中国城市林业,2025,23(2):75-83.

[22]苗雪,金京,冷从斌,等.基于景观格局的石林彝族自治县景观生态风险评价[J].中国城市林业,2024,22(1):170-176.

[23]王涛,肖彩霞,刘娇,等.云南高原湖泊杞麓湖动态演变及景观生态风险评价[J].浙江农林大学学报,2020,37(1):9-17.

[24]傅微,吕一河,傅伯杰,等.陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):290-299.

[25]陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析:以阜康三工河流域为例[J].生态学杂志,2003,22(4):116-120.

[26]谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.

[27]张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.

[28]高建,李彤,贾宝全,等.生态用地空间稳定性及其格局分析:以咸阳市为例[J].生态学报,2022,42(23):9843-9856.

[29]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[30]胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.流域景观结构的城市化影响与生态风险评价[J].生态学报,2011,31(12):3432-3440.

[31]杜娟.滇池流域降水-气温-蒸散发时空分布及相关性研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.