



## 昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究

李志英 李媛媛 薛梦柯 李文星 王晓云

### The Change of Landscape Pattern and Its Ecological Environment Effect in Kunming

Li Zhiying, Li Yuanyuan, Xue Mengke, Li Wenxing, Wang Xiaoyun

引用本文:

李志英, 李媛媛, 薛梦柯, 李文星, 王晓云. 昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究[J]. 西南林业大学学报, 2023, 43(4):152–163. doi: 10.11929/j.swfu.202203063

Li Zhiying, Li Yuanyuan, Xue Mengke, Li Wenxing, Wang Xiaoyun. The Change of Landscape Pattern and Its Ecological Environment Effect in Kunming[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2023, 43(4):152–163. doi: 10.11929/j.swfu.202203063

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202203063>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 遵义市生态系统服务价值与土地生态安全协调度分析

Coordination Degree Between Ecosystem Services Value and Land Ecological Security Level in Zunyi  
西南林业大学学报. 2017, 37(5): 141–146 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.05.021>

#### 保山市城区景观格局时空变化研究

Temporal and Spatial Variation of Landscape Pattern in Baoshan City  
西南林业大学学报. 2020, 40(6): 97–106 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004060>

#### 南岳森林景观格局特征及其稳定性研究

Study on Landscape Pattern and Stability of Nanyue Forest  
西南林业大学学报. 2020, 40(3): 148–154 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201905075>

#### 海口市2000—2015年城乡交错带景观格局梯度变化研究

Gradient Changes of Landscape Pattern in Urban-rural Ecotone of Hai Kou City from 2000 to 2015  
西南林业大学学报. 2018, 38(1): 133–139 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.01.021>

#### 基于RS与GIS的旗山森林公园景观格局变迁分析

Landscape Pattern Change of Qishan Forest Park Based on GIS and RS  
西南林业大学学报. 2017, 37(4): 140–149 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.04.021>

#### 陕西靖边天保工程森林生态系统服务功能价值评估

Assessment on Forest Ecosystem Services Function Value of Natural Forest Protection Project in Jingbian County of Shaanxi Province  
西南林业大学学报. 2017, 37(4): 58–66 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.04.010>

DOI: 10.11929/j.swfu.202203063

引文格式: 李志英, 李媛媛, 薛梦柯, 等. 昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(4): 152–163.

## 昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究

李志英 李媛媛 薛梦柯 李文星 王晓云

(云南大学建筑与规划学院, 云南昆明 650091)

**摘要:** 以昆明城市景观为研究对象, 采用景观格局指数、景观生态风险指数和生态系统服务价值系数探究 1990—2018 年景观格局变化及其生态环境效应, 利用 GWR 模型分析生态环境效应与建设用地扩展的相关性。结果表明: 市域景观类型变化程度在 1990—2000 年的城市化起步阶段相对稳定, 在 2000 年后的城市化加速阶段动态变化加剧; 景观格局指数变化呈稳定—不稳定趋势, 1990—2000 年, 景观破碎度、形状不规则程度轻微下降, 2000 年后景观边界复杂程度加剧, 优势景观的控制作用在减小, 景观总体趋于破碎和均匀。景观格局变化带来了生态过程的变化, 市域景观生态风险和生态系统服务价值均在降低; 景观生态风险、生态系统服务价值在城市化水平最高的滇池流域内呈现出低等级区的环湖之势, 其扩展路径与城市发展路径基本一致。生态环境效应总体均呈现出与建设用地扩展的负相关, 且 2010—2018 年的负相关达到峰值, 说明城市化加快带来了景观生态风险和生态系统服务价值的降低; 建成区边缘的景观生态风险与建设用地扩展呈正相关, 是景观生态风险的重点防控区。

**关键词:** 景观格局; 生态风险; 生态系统服务价值; 生态环境效应; 昆明

中图分类号: TU984.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)04-0152-12

## The Change of Landscape Pattern and Its Ecological Environment Effect in Kunming

Li Zhiying, Li Yuanyuan, Xue Mengke, Li Wenxing, Wang Xiaoyun

(School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan 650091, China)

**Abstract:** Taking Kunming as the research object, the landscape pattern change and its eco-environmental effects from 1990 to 2018 were studied by using landscape pattern index, landscape ecological risk index and ecosystem service value coefficient, and the correlation between eco-environmental effects and construction land expansion was analyzed by GWR model. The results show that the change degree of urban landscape types is relatively stable in the initial stage of urbanization from 1990 to 2000, and the dynamic change is intensified in the accelerated stage of urbanization after 2000. The change of landscape pattern index showed a stable-unstable trend. From 1990 to 2000, the degree of landscape fragmentation and irregular shape decreased slightly. After 2000, the complexity of the landscape boundary intensified, the controlling effect of the dominant landscape decreased, and

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668065) 资助; 云南省哲学社会科学规划项目 (YB2022044) 资助; 云南大学研究生科研创新基金项目 (2021Z080) 资助。

第 1 作者: 李志英 (1975—), 女, 博士, 教授。研究方向: 城市空间增长边界。Email: lizhy@ynu.edu.cn。

通信作者: 李媛媛 (1996—), 女, 硕士研究生。研究方向: 城市空间结构与生态安全。Email: lyy melody@126.com。

the landscape tended to be broken and uniform as a whole. The change of landscape pattern has brought about changes in the ecological process, and the urban landscape ecological risk and ecosystem service value are all reducing. The landscape ecological risk and ecosystem service value show a low-grade trend around the lake in the Dianchi Lake Basin with the highest level of urbanization, and its expansion path is basically consistent with the urban development path. On the whole, the eco-environmental effects showed a negative correlation with the expansion of construction land, and the negative correlation reached the peak from 2010 to 2018, indicating that the acceleration of urbanization has brought about the decrease of landscape ecological risk and ecosystem service value. The landscape ecological risk at the edge of the construction area is positively correlated with the expansion of construction land, which is the key prevention and control area of landscape ecological risk.

**Key words:** landscape pattern; ecological risk; ecosystem service value; ecological environment effect; Kunming

根据“格局—过程”理论，在气候变化、地理环境等自然干扰和城市化等人为干扰影响下，土地利用景观格局呈现出空间异质性，进而产生不同的生态过程表征<sup>[1]</sup>。识别景观格局演变的正向和负向表征能揭示外在干扰对生态安全的作用机制，体现生态环境对干扰的响应。生态环境效应则反映了生态环境系统结构和功能的变化过程<sup>[2]</sup>。目前，有关生态环境效应的研究涉及生态风险<sup>[3]</sup>、生态系统服务价值<sup>[4]</sup>、综合生态环境效应<sup>[5]</sup>等，其中，生态风险、生态系统服务价值与生态安全联系紧密<sup>[6]</sup>。生态系统服务价值定量评估了自然环境与效用<sup>[7]</sup>，强调了生态系统的功能特征<sup>[8]</sup>，对生态安全状况有正面表征作用<sup>[9]</sup>。生态风险则从反面表征了景观格局变化可能产生的不利影响<sup>[8]</sup>；其中，景观生态风险作为景观尺度上的生态风险评价，侧重于反映生态系统空间镶嵌的结构和分布特点，对景观结构特征反映较深入。生态环境效应研究的内容涵盖评价<sup>[10]</sup>、预测<sup>[11]</sup>、与生态过程的耦合<sup>[12]</sup>等，城市化带来的生态环境效应变化的研究成为热点<sup>[3]</sup>。

快速城市化会致使城市下垫面发生变化，进而导致景观格局变化，生态系统功能面临退化风险<sup>[13]</sup>。诺瑟姆认为城市化水平在30%~70%是“城市化病”的高发期<sup>[14]</sup>。昆明市是云南省城市化要素最聚集的区域，建成区依托滇池流域的坝区向外扩张，生态系统脆弱度不断加重。2006—2015年的滇池污染带来滇池供水功能削弱，经济损失严重<sup>[15]</sup>。东川区长期的矿石开采和森林砍伐带来大面积荒坡荒山，林地的土壤保持和生物多样性维护功能下降<sup>[16]</sup>。主城区环境地质问题趋于严重，地下水的过量抽取致使地面沉降的风险加剧<sup>[17]</sup>。因此，减少快速城市化对生态环境的胁迫、维护区域生态安全成为了昆明市可持续发展亟需解决的问题。然而在昆明市以及生态环境脆弱的高原山地区域，从正、负角度综合反映生态环境效应的研究较少，生态环境效应与城市化的关联研究还有待丰富。

基于此，为了揭示景观格局演变的正向和负向生态过程，量化城市化对生态环境的作用机制，研究选取高原山地城市昆明市为研究对象，以景观生态风险体现外界干扰对生态环境带来的胁迫，以生态系统服务价值体现生态服务功能的变化。建设用地扩展强度能反映区域城市化水平，因此利用地理加权回归（GWR）模型探究生态环境效应与建设用地扩张的相关性，以期明晰快速城市化背景下生态环境对城市化的响应。

1 研究区概况

昆明市位于云南省中部，地势北高南低，北部多山，南部较平缓。全市面积2.1万km<sup>2</sup>，市域范围内气候类型随山地、河谷、盆地的不同地势和海拔而变化，具有典型的立体气候特征。昆明盆地边缘山势起伏大且地质不稳定，城市空间主要依托坝区发展，同时城市发展受“三山”（金马山、碧鸡山、长虫山）的阻隔，城市扩张挤占耕地的情况趋于加重<sup>[18]</sup>。昆明市也是全省人口和经济最聚集的地区。1990年、2000年、2010年、2018年的城市化率分别为52.95%、54.94%、63.60%、72.85%，由此可知，2000年后的城市化进程持续加快。2018年，昆明市的人口约为685万人，占云南省总人口的14.18%，地区生产总值5206.9亿元，三次产业结构为4.3:39.1:56.6，已基本形成第三产业主导。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

遥感影像数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 1990年、2010年为 Landsat 4/5 TM 遥感影像, 2000年为 Landsat 7 ETM 遥感影像, 2018年为 Landsat 8 OLI 遥感影像, 云量均小于5%, 影像时间集中在2—5月、10—12月。土地利用数据分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地, 通过对遥感影像的预处理、监督分类后获得, Kappa 精度在85%以上, 基本满足数据精度要求。社会经济数据来源于1990—2018年云南统计年鉴, 主要包括粮食总产量、粮食播种面积等。

### 2.2 景观格局指数分析

为反映昆明市景观水平整体特征, 选取斑块密度 (PD)、最大斑块数 (LPI) 反映景观面积与数量特征; 选取景观形状指数 (LSI)、边缘密度 (ED) 反映景观形状特征; 选取香浓多样性指数 (SHDI)、香浓均匀度指数 (SHEI) 反映景观多样性特征; 选取蔓延度 (CONTAG)、聚合度 (AI) 反映景观集聚程度, 各景观指数生态学意

义及计算方法参阅相关文献<sup>[19]</sup>。

### 2.3 生态环境效应评价

#### 2.3.1 评价价格网单元划分

通过阅读相关文献<sup>[20]</sup>, 按照平均斑块面积 (约 2.88 km<sup>2</sup>) 的 2~5 倍对研究范围进行等距离采样, 最后划分为 3 km × 3 km 网格, 共 2569 个采样单元。分别计算各评价单元景观生态风险和生态系统服务价值并赋值到采样中心点, 采用 ArcGIS 中地统计分析中的普通克里金插值法进行半变异函数拟合和空间特征变换, 以直观表征其空间分布。

#### 2.3.2 景观生态风险评价模型构建

景观生态风险指数由与干扰相关联且可用于度量生态终点的景观格局指数共同反映<sup>[20]</sup> (表 1)。参考相关文献<sup>[21-22]</sup>, 将未利用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地的景观脆弱度指数赋值为 6、5、4、3、2、1; 归一化处理得到其权重值: 未利用地为 0.2857, 水域为 0.2381, 耕地为 0.1905, 草地为 0.1429, 林地为 0.0952, 建设用地的 0.0476。景观干扰度指数反映了生态系统受到干扰的程度<sup>[23]</sup>, 通过专家咨询并结合前人研究<sup>[22-23]</sup>, 将 a、b、c 分别赋值为 0.5、0.3、0.2。

表 1 景观生态风险指数计算方法

Table 1 Calculation method of landscape ecological risk index

名称	计算方法
干扰度指数 ( $S_i$ )	$S_i = aC_i + bN_i + cD_i$
脆弱度指数 ( $F_i$ )	由专家咨询法并归一化获得
景观损失度指数 ( $R_i$ )	$R_i = S_i \times F_i$
破碎化指数 ( $C_i$ )	$C_i = n_i/A_i$
分离度指数 ( $N_i$ )	$N_i = l_i \times A/A_i, l_i = 0.5 \sqrt{n_i}/\sqrt{A}$
优势度指数 ( $D_i$ )	$D_i = (Q_i + M_i)/4 + L_i/2, Q_i = n_i/N, M_i = B_i/B, L_i = S_i/S$
景观生态风险指数 (ERI) <sup>[24]</sup>	$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times \sqrt{R_i}$

注:  $n_i$ 为景观类型*i*的斑块数量;  $A_i$ 为景观类型*i*的总面积;  $A$ 为景观总面积;  $N$ 为总斑块数量;  $B_i$ 为斑块*i*样本数量;  $B$ 为样本总数量;  $S_i$ 为斑块*i*的面积;  $S$ 为总样本面积, a、b、c分别为  $C_i$ 、 $N_i$ 和  $D_i$ 的权重, 且  $a + b + c = 1$ ;  $A_{ki}$ 为第*k*个评价价格网*i*类景观组分的面积,  $A_k$ 为第*k*个评价价格网的面积。

#### 2.3.3 生态系统服务价值评估

谢高地等<sup>[25]</sup>在2008年基于 Costanza 的方法做出改进, 形成了生态系统价值评估体系。借鉴谢高地等<sup>[25]</sup>的生态系统服务价值当量表, 建设用地系数借鉴庞敏<sup>[26]</sup>的研究, 基于昆明市社会发展情况, 修正单位面积农田每年自然粮食产量

的经济价值。计算得到1990—2018年单位播种面积粮食产量为 4443.62 kg/hm<sup>2</sup>, 粮食价格参考前人研究<sup>[27]</sup>, 得到平均粮食均价为 1.92 元/kg。最终得到昆明市一个生态系统服务价值当量因子的经济价值为 1218.82 元, 进而得到生态系统单位面积生态服务功能价值系数 (表 2)。

表 2 单位面积生态系统服务价值系数表  
Table 2 Value coefficient of ecosystem services per unit area

一级分类	二级分类	元/hm <sup>2</sup>					
		农田	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
供给服务	粮食生产	1218.82	402.21	524.09	645.98	0.00	24.38
	原材料生产	475.34	3632.09	438.78	426.59	0.00	48.75
调节服务	气候调节	1182.26	4960.60	1901.36	2510.77	0.00	73.13
	气体调节	877.55	5265.30	1828.23	621.60	0.00	158.45
	水文调节	938.49	4984.98	1852.61	22877.26	-9202.09	85.32
	净化环境	1694.16	2096.37	1608.84	18099.48	-2998.30	316.89
支持服务	保持土壤	1791.67	4899.66	2730.16	499.72	0.00	207.20
	维持生物多样性	1243.20	5496.88	2279.19	4180.55	0.00	487.53
文化服务	提供美学景观	207.20	2535.15	1060.37	5411.56	0.00	292.52
	合计	9628.68	34273.23	14223.64	55273.51	-12200.39	1694.16

2.4 地理加权回归分析

以建设用地扩展强度指数为自变量，以景观生态风险、生态系统服务价值变化值为因变量，探索建设用地与生态环境效应在时空上的回归关系<sup>[12]</sup>。

$$E_i = \frac{U_i}{A_i \times \Delta t} \times 100 \quad (1)$$

式中： $E_i$  为  $i$  区域建设用地扩展强度指数， $U_i$  为  $i$  区域研究时段扩展面积的差值， $A_i$  为  $i$  区域土地总面积， $\Delta t$  表示时间段。

地理加权回归模型选择更高精度的自适应核类型，带宽计算选用 AICC 方法。模型结构如下：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (2)$$

式中： $y_i$  为回归值， $(u_i, v_i)$  为样点  $i$  的坐标， $\beta_0(u_i, v_i)$  为  $i$  点回归常数， $\beta_k(u_i, v_i)$  是  $i$  点上的第  $k$  个回

归参数； $p$  为独立变量个数； $x_{ik}$  为独立变量  $x_k$  在  $i$  点的值； $\epsilon_i$  是随机误差。

3 结果与分析

3.1 昆明市景观格局变化分析

3.1.1 景观类型结构变化特征

1990—2018 年，林地是昆明市最主要的景观类型，面积占比为 45.08%~45.68%；草地面积占比次之。建设用地面积占比增加了 3.49%，增加比例最大；耕地面积减少了 1.69%，减少比例最大（表 3）。对比 3 个时段，1990—2000 年变化较不突出，2000 年之后，各景观类型的变化程度加大。其中，耕地、草地面积持续减小，建设用地、水域面积持续增加。

表 3 1990—2018 年昆明市景观类型结构变化表

Table 3 Changes of landscape types and structures in Kunming from 1990 to 2018

景观类型	面积占比/%				面积变化率/%		
	1990年	2000年	2010年	2018年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2018年
耕地	20.74	20.25	19.94	19.06	-2.40	-1.51	-4.44
林地	45.55	45.68	45.58	45.08	0.29	-0.23	-1.09
草地	29.24	29.19	28.38	27.67	-0.16	-2.78	-2.48
水域	2.23	2.25	2.32	2.45	0.94	3.05	5.37
建设用地	1.92	2.31	3.44	5.41	20.19	49.36	57.10
未利用地	0.32	0.32	0.34	0.33	0.00	5.17	-1.36

受规划、政策引导，昆明市 2000 年前的城市化水平提升缓慢，城市空间以单中心的模式向外扩展，处于高原坝区的中心城区景观格局变化较

大，建设用地增加相对缓慢。又得益于造林工程和长江上游水土保持重点防护工程，林地、水域面积小幅上升。2000 年后，昆明市进入城市化水

平快速提升期,《昆明市城市总体规划(2011—2020)》<sup>[28]</sup>确定了中心城区“一主二副”的多中心布局,提出了“一湖四片”“一湖四环”的规划构想,城市空间环滇池发展的态势更为明显。城市人口的快速聚集促使建设用地开发强度增大,耕地、林地、草地锐减。其中,2000—2010年为建设用地变化开始显著的时期,此阶段昆明市开始大兴土木,政策和规划的引导促使城市进入快速建设时期,草地面积的下降最显著,其次是耕地。2010—2018年,耕地面积下降最显著,其次是草地;建设用地变化率比上一时段增加约8%,面积增加达到峰值。

### 3.1.2 景观格局指数变化特征

由图1可知,景观面积与数量上,昆明市的

PD在1990—2000年减少而后大幅递增;LPI在1990—2010年小幅递增而后下降明显。表明在1990—2000年,景观破碎化程度在降低,2000年后景观破碎化程度有加剧趋势,优势景观类型的控制作用在急剧减小,尤其以2010年后变化最为剧烈。反映出2000年后,城市化致使景观破碎化和均匀化,这是由于耕地、林地等大型斑块的面积在缩小,建设用地中大型斑块面积在增加,体现出城市化对生态用地的施压。

景观形状上,LSI、ED在1990—2000年降低而后增加,表明1990—2000年的斑块形状不规则程度有所降低,而2000年后不规则程度加深。景观水平上总体呈现边界复杂化,各景观类型受人类活动干扰的影响程度在加深。

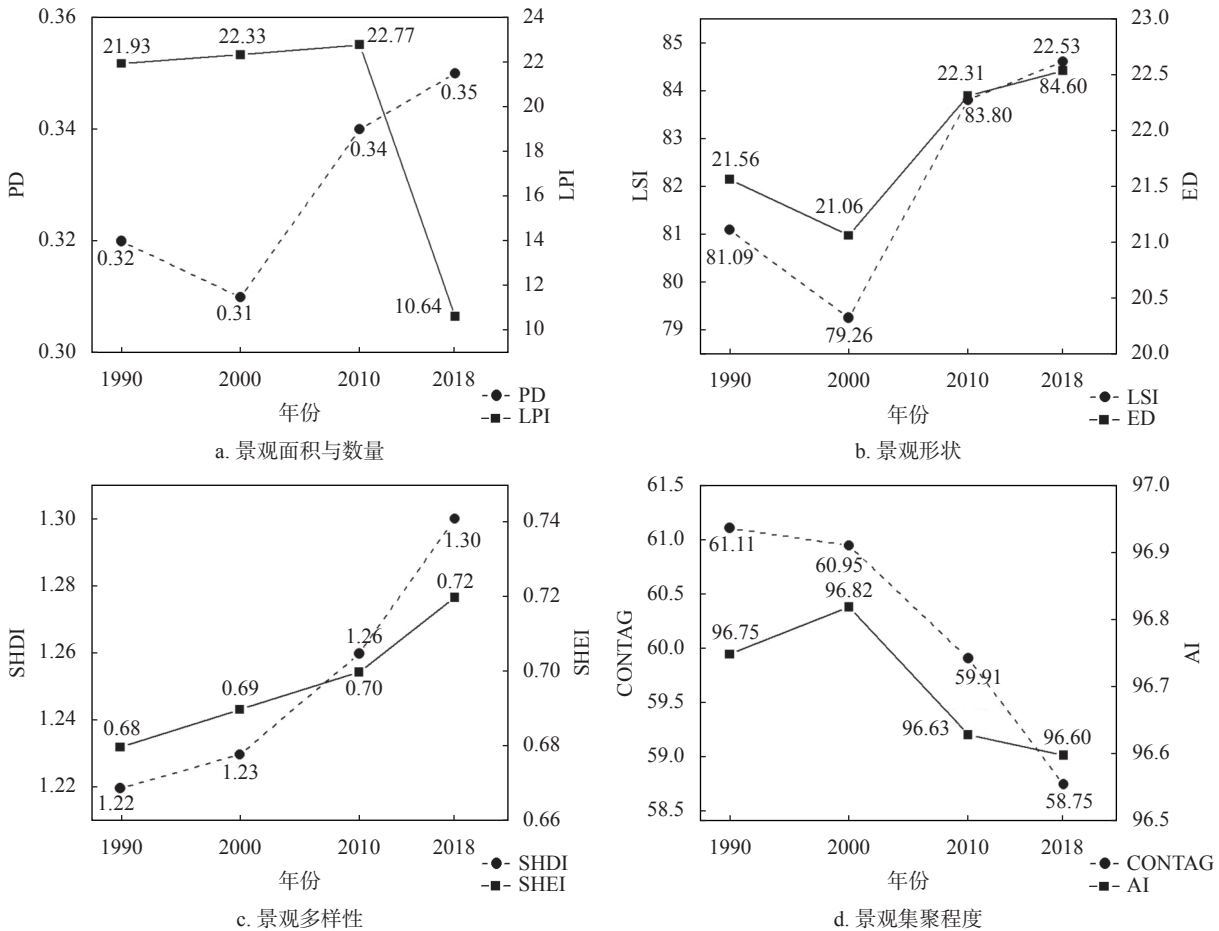


图1 1990—2018年昆明市景观水平景观格局指数变化

Fig. 1 Changes of landscape pattern index at landscape level in Kunming from 1990 to 2018

景观多样性上,SHDI、SHEI持续增加,表明景观整体优势度在降低,景观多样性和景观异质性程度在增大,总体向均匀化和多样化发展。这是由于建设用地集中成片致使斑块面积增加,部分生态用地斑块面积减小,各景观类型的斑块

尺度趋于均匀。景观集聚程度上,CONTAG持续降低,AI在1990—2000年小幅增加而后降低,总体呈降低趋势。表明区域景观破碎度在提高,景观斑块的聚合程度以及优势景观类型的控制作用在减小。

综上，2000年是景观格局变化的重要节点。2000年之前，得益于植树造林工程，林地斑块的稳定和聚合程度有所提高，区域内景观破碎化程度和斑块形状不规则程度有所降低。2000年之后，昆明市进入快速城市化阶段，景观破碎度、形状不规则程度均在加深，斑块的聚合程度、优势景观的控制作用在减小，总体呈均匀化、多样化态势。

### 3.2 景观生态风险分析

#### 3.2.1 景观生态风险时空变化分析

统计得到各等级景观生态风险面积（图2、

表4）。时序特征上，景观生态风险平均值分别为0.1249、0.1247、0.1236、0.1228，呈下降趋势，其中1990—2000年变化相对不明显。较低值区、中等值区在区域中占比最大，分别大于47.30%、38.89%；高值区占比最小，约为1%以下。空间特征上，高值、较高值区集中在滇池及其周边、嵩明县；较低值区和中等值区分布广泛，且前者占比不断加大，后者占比持续减小；低值区集中在滇池流域内，随着建设用地的扩展，围绕滇池连片呈带向外扩展。

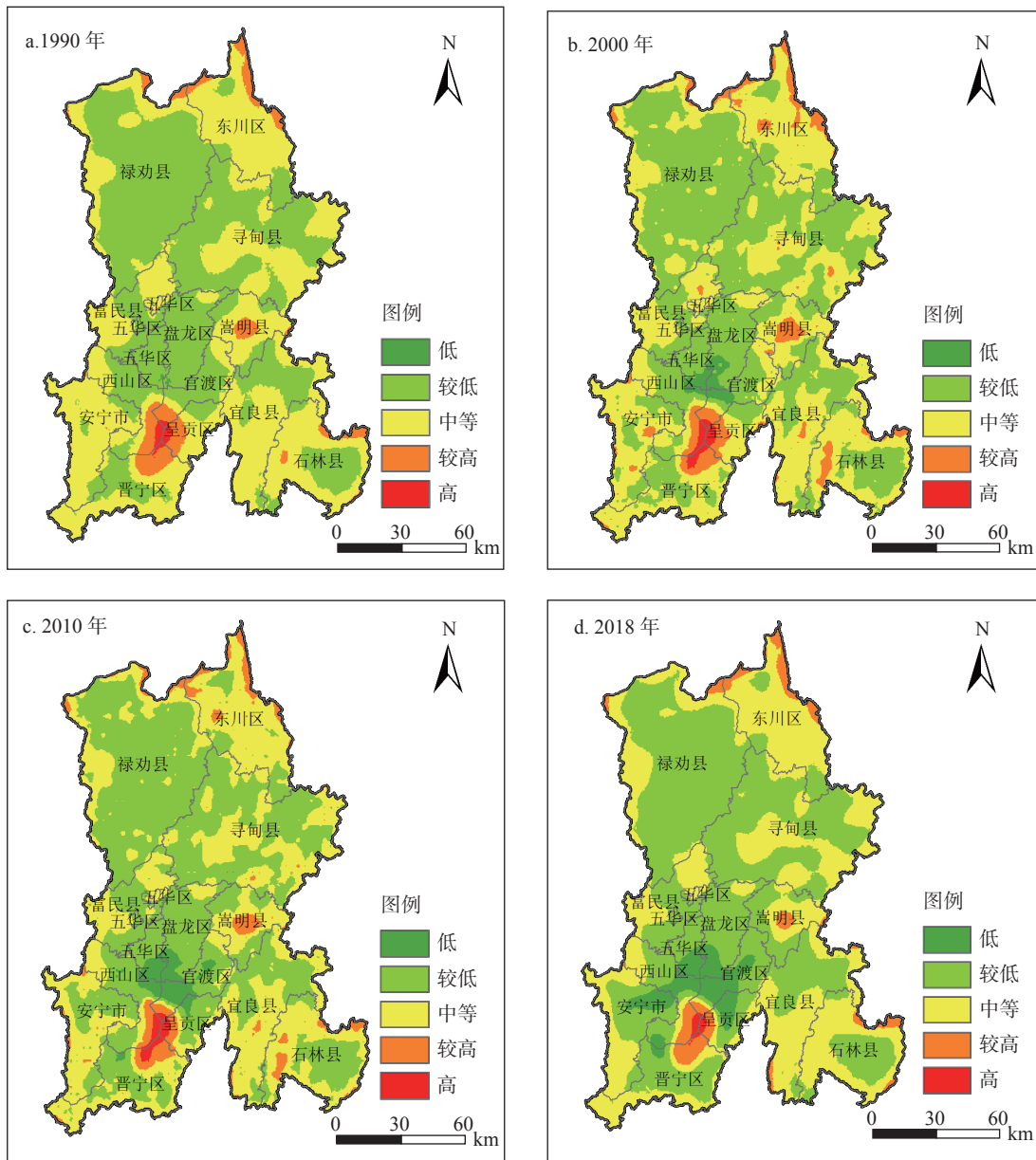


图2 1990—2018年昆明市景观生态风险变化图

Fig. 2 Landscape ecological risk change of Kunming City from 1990 to 2018

表 4 1990—2018 年昆明市景观生态风险等级面积统计表

Table 4 Statistics of landscape ecological risk grade area of Kunming City from 1990 to 2018

年份	低值区		较低值区		中等值区		较高值区		高值区	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
1990	11.28	0.05	9941.83	47.30	10008.63	47.61	972.85	4.63	86.12	0.41
2000	265.05	1.26	10156.11	48.31	9269.17	44.10	1182.69	5.63	147.69	0.70
2010	499.49	2.38	10783.83	51.30	8601.89	40.92	987.00	4.70	148.50	0.71
2018	967.75	4.60	10962.66	52.15	8175.74	38.89	848.63	4.04	65.94	0.31

1990 年, 较低值区和中等值区占比均在 47% 左右, 低值区以小斑块的形式集中在五华区、盘龙区内, 面积占比约为 11%。2000 年后, 滇池流域、嵩明县、安宁市的较低值区不断侵占中等值区, 在空间上逐渐集中连片。较高值区稳定存在于滇池岸线周边及嵩明县内, 这是由于滇池岸线周边的水域、草地、建设用地分布破碎, 景观稳定性较差; 嵩明县局部建设用地和耕地斑块分布也较破碎。东川区、宜良县、石林县、安宁市、嵩明县的较高值区占比先增加后减少, 这是由于安宁市、嵩明县在建设初期建设用地破碎度大, 其后, 建成区斑块趋于完整, 景观破碎度减小。东川区山地起伏大, 面临水土流失带来的岩石裸露, 其草地、林地交错分布, 耕地、建设用地斑块形态相比坝区较不规整, 故整体景观破碎度和景观分离度大。宜良县、石林县局部喀斯特地貌显著, 植被生长环境相对较差, 林地、草地景观破碎度大, 景观稳定性相对较差, 故景观生态风险较大。由于水域的景观脆弱度大, 景观生态风险高值区稳定存在于滇池。另外, 低值区在 2000 年后变化最明显, 在主城区呈环滇池发展之势, 并且呈现出昆明主城—嵩明、昆明主城—安宁、昆明主城—呈贡的扩展路径, 这是由于规划引导下, 主城区建设用地连绵成片且形状趋于完整, 尤其体现在 2008 年后。该阶段一主(主城区)二副(空港经济区、呈贡新区)的城市空间结构开始培育, 而安宁市作为滇中城市群中昆明主城向西的交通节点, 建设用地面积增速也较明显。因此, 在建设用地斑块形态趋于完整的态势下, 低值区与建设用地扩展路径基本一致。

### 3.2.2 景观生态风险与建设用地扩展的关系

根据回归系数结果(表 5)可知, 平均值、

标准差在减小, 回归系数最大值不断向 0 靠近, 负值网格比例由 57.475% 上升至 91.285%。总的来说, 随着城市扩展强度的加强, 景观生态风险逐渐降低, 两者整体呈负相关关系。

表 5 GWR 模型回归系数统计表

Table 5 Statistics of regression coefficients of GWR model

时间	平均值	标准差	最大值	最小值	负值网格占比/%
1990—2000年	0.577	4.228	40.943	-11.476	57.475
2000—2010年	-0.006	0.089	0.698	-1.334	62.117
2010—2018年	-0.004	0.004	0.012	-0.041	91.285

将建设用地扩展有值网格回归系数图示化后可知(图 3), 1990—2000 年, 主城区中的回归系数负值网格集中在五华区、盘龙区建成区内; 正值网格集中在官渡区、西山区建成区边缘的滇池岸线处。由于五华区、盘龙区的建成区已具规模, 这些区域表现出建设用地扩展强度越大, 景观生态风险越低。而在建成区边缘处以及滇池岸线附近, 耕地与建设用地交错分布, 城市扩展处在萌芽期, 其规模和形状尚不完整, 这些区域景观破碎度和分离度相对较大, 景观形态不稳定, 景观生态风险较大。2000—2010 年, 负相关性相比上阶段有轻微增强, 主要是由于建设用地迅速扩张之下, 负值网格在建成区增加较多。2010—2018 年, 建成区负值网格进一步增加, 负相关性达到顶峰, 禄劝县以及呈贡区、五华区、安宁市的建成区边缘处呈现建设用地与景观生态风险的正相关。禄劝县因为建设用地斑块较为细碎和分散, 故景观破碎度较大; 五华区等建成区边界处的建设用地斑块相对破碎, 故景观生态风险也相对较大。



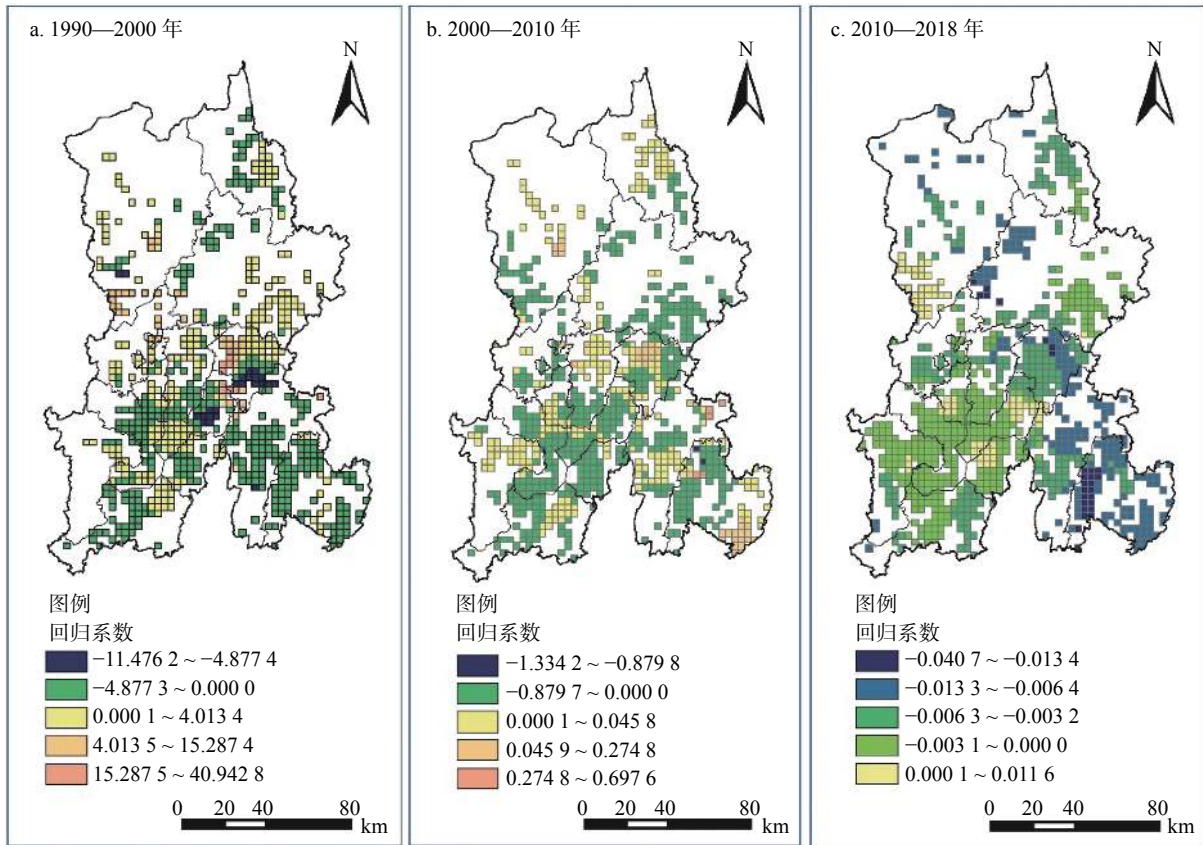


图3 昆明市景观生态风险与建设用地扩展的回归系数

Fig. 3 Regression coefficient between landscape ecological risk and construction land expansion in Kunming

### 3.3 生态系统服务价值分析

#### 3.3.1 生态系统服务价值时空变化分析

统计得到各等级生态系统服务价值面积 (图4、表6)。时序特征上, 单位面积生态系统服务价值分别为22819.1、22771.2、22486.6、21983.0元/hm<sup>2</sup>, 总体呈下降趋势, 其中1990—2000年的下降趋势较小, 2000年后的下降趋势明显。低值区、较低值区面积逐年增加, 中等值区逐年下降, 较高值区在1990—2000年面积占比增加而后降低, 高值区在1990—2010年面积占比较轻微增加而后降低。空间特征上, 低值区主要集中在主城区等建设用地开发强度大的地区, 并伴随着建设用地向外扩张环滇池集中; 较低值区呈以低值区为中心的向外扩散之势; 中等值区和较高值区占比较大, 总体呈南少北多的态势; 高值区集中在滇池。

1990—2000年, 生态系统服务价值变化主要发生在禄劝县, 较高值区面积有所增加, 这是由于植树造林工程使得禄劝县林地有所增加。由于主城区建设用地侵占耕地、生态用地致使生态系统服务价值降低, 低值区占比增加。2000—2010

年, 滇池流域所及区县、嵩明县、安宁市变化最明显。低值区由主城区延伸至呈贡区, 主城区连接嵩明县的较高值区有被低等级区替代的趋势; 较低值区斑块逐渐集中连片, 在滇池流域形成由东向西的环抱之势。这是因为2000年后, “一主二副”的城市空间结构开始培育, 呈贡区和官渡区、嵩明县城市建设加快, 安宁市受滇中城市群规划引导, 建设用地快速扩张, 故低值、较低值区呈现出与城市扩张相似的路径。2010—2018年, 低值、较低值区变化更为明显, 呈贡区的低值区进行一步扩大, 昆明主城—嵩明的较低值通道已形成, 昆明主城—安宁的较高值壁垒已经破除, 滇池周边已基本被较低值区环绕。城市副中心、安宁市工业园区的建设使得建设用地逐渐集中连片, 高生态系统服务功能的生态用地被挤占, 因此该区域生态系统服务价值降低。另外, 由于水土流失导致大面积的林地斑块缺乏, 东川区局部地区生态系统服务价值一直处于较低等级。滇池则由于水体的生态系统服务功能较强, 一直处于高等级区。

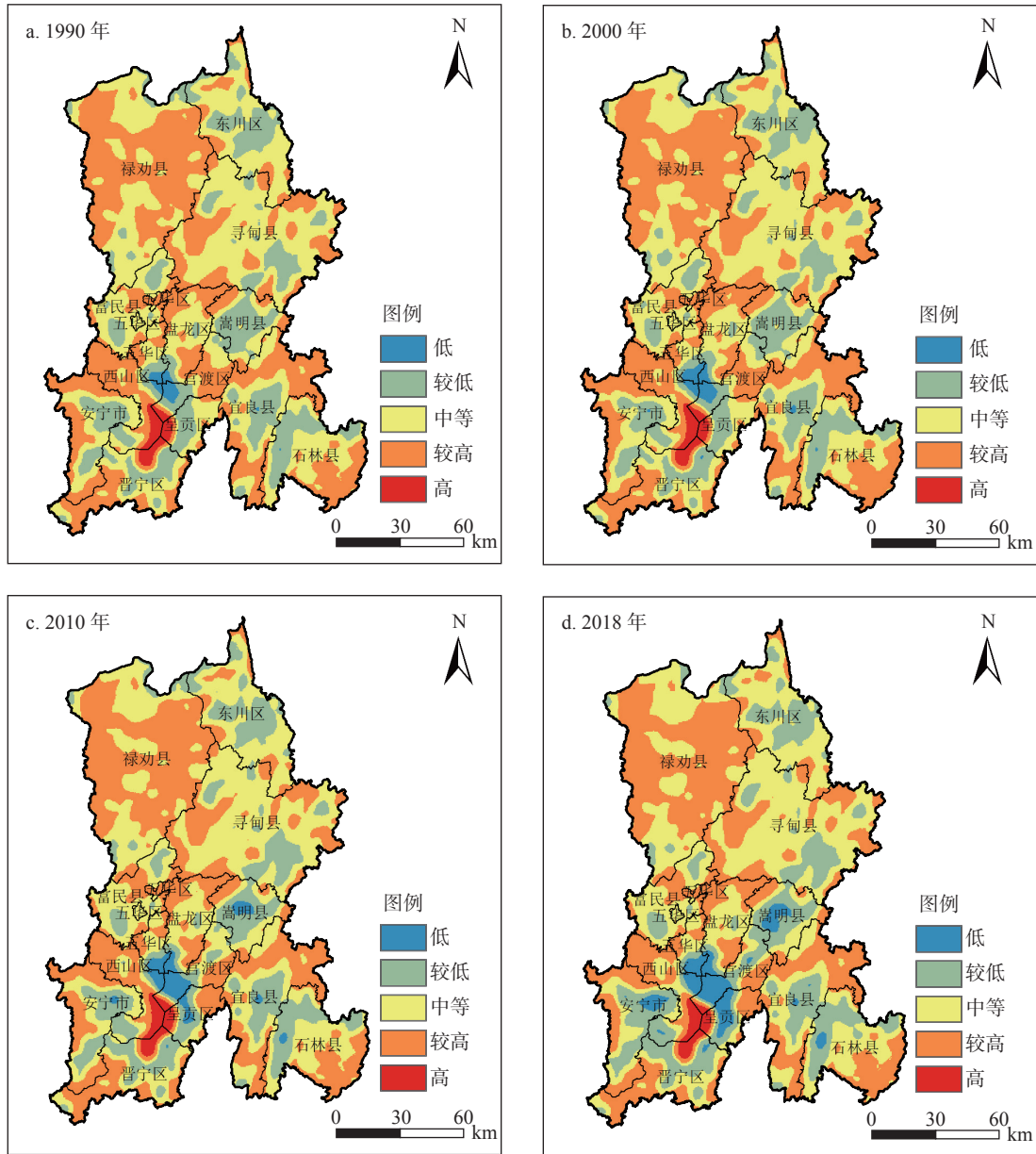


图 4 1990—2018 年昆明市单位面积生态系统服务价值变化图

Fig. 4 Change of ecosystem service value per unit area in Kunming from 1990 to 2018

表 6 1990—2018 年昆明市单位面积生态系统服务价值等级面积统计

Table 6 Statistics of ecosystem service value grade area per unit area in Kunming from 1990 to 2018

年份	低值区		较低值区		中等值区		较高值区		高值区	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
1990	129.68	0.62	3 703.75	17.62	8 590.71	40.87	8 358.33	39.76	238.24	1.13
2000	199.13	0.95	3 751.08	17.84	8 362.32	39.78	8 468.46	40.29	239.72	1.14
2010	405.58	1.93	3 744.59	17.81	8 307.58	39.52	8 320.04	39.58	242.92	1.16
2018	685.28	3.26	3 817.39	18.16	8 224.88	39.13	8 068.50	38.38	224.66	1.07

3.3.2 生态系统服务价值与建设用地扩展的关系  
研究时段内，回归系数负值比例在增加（表 7、图 5）；最大值在降低且向 0 靠近，平均

值、标准差也在降低，建设用地扩展与生态系统服务价值总体呈负相关关系。1990—2000 年，78.955% 的网格为负值，主城区内基本为负值网

格，嵩明县、宜良县、禄劝县、官渡区东北部为正值网格集中区域。为加强单中心格局，这个阶段城市扩展主要集中在五华区、盘龙区，故城市扩展对该区域生态系统服务减少的作用较突出。2000—2010年，76.276%的网格为负值，比例略下降，但负值网格数依然增加较多。这一阶段正值网格集中在宜良县、石林县、晋宁县、五华区，这些区域建设用地扩展速度相对较小，城市扩展对生态系统服务价值下降的贡献作用尚不突出。2010—2018年，二者的负向关系最明显，负值网格比例上升至97.059%，正值网格集中在禄劝县、宜良县内，这些区域生态用地分布较广，建设用地的增加对生态系统服务价值减少的作用

较轻微。总的来看，随着建设用地扩展，生态系统服务价值降低程度逐渐加剧。

表7 GWR模型回归系数统计表

Table 7 Statistics of regression coefficients of GWR model

统计量	1990—2000年	2000—2010年	2010—2018年
平均值	1.437	0.264	-0.173
最大值	152.854	73.547	0.246
最小值	-50.722	-62.269	-0.833
标准差	17.795	5.539	0.121
负值网格占比/%	78.955	76.276	97.059

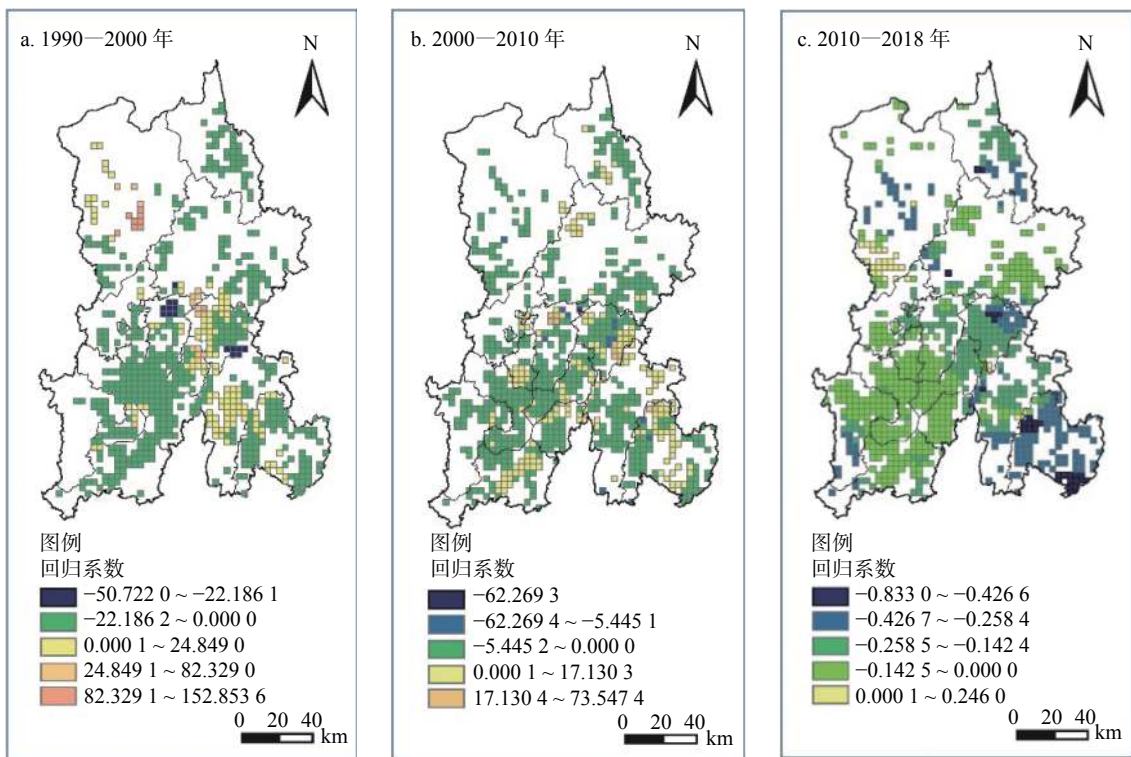


图5 昆明市生态系统服务价值与建设用地扩展的回归系数

Fig. 5 Regression coefficient between ecosystem service value and construction land expansion in Kunming

#### 4 结论与讨论

研究从正、负面角度探究了1990—2018年昆明市景观格局及其生态环境效应的变化特征，进一步探索了生态环境效应与建设用地扩展的关系，得出以下结论：

1) 各景观类型在1990—2000年的城市化起步阶段相对稳定，在2000年后的城市化加速阶段动态变化加剧。受规划、政策引导，耕地、草地面积持续减小，建设用地、水域面积持续增加，其中，建设用地变化程度最大。

2) 景观格局指数变化与昆明市城市化进程呈现出相关性，即稳定—不稳定的特征。得益于生态建设工程，1990—2000年的景观破碎程度、斑块形状不规则程度轻微下降；2000年后，景观边界复杂程度加剧，优势景观的控制作用减小，景观总体趋于破碎化和均匀化。

3) 景观格局的变化带来了生态过程的变化。在规划引导下，滇池流域内的生态环境效应低值区呈现出昆明主城—嵩明、昆明主城—安宁、昆明主城—呈贡的扩展路径。景观生态风险平均值由0.1249下降至0.1228，高值、较高值区集中在

滇池周边、嵩明县。低值区集中在滇池流域的主城区内并环滇池向外扩张。由于建设用地侵占耕地、生态用地,单位面积生态系统服务价值平均值由22819.1元/hm<sup>2</sup>降至21983.0元/hm<sup>2</sup>,低值区集中在主城区等建设用地开发强度大的地区并环滇池向外扩张。较低值区以低值区为中心向外扩散,集中在滇池流域、市域北部及东南部。中等值区和较高值区总体呈南少北多的特点,高值区集中在滇池。

4)景观生态风险和生态系统服务价值总体均呈现出与建设用地扩展的负相关关系,负值网格占比分别由57.475%上升至91.285%、78.955%上升至97.059%,说明城市化加快带来了景观生态风险和生态系统服务价值的降低。而由于建成区边缘的建设用地扩展相对跳跃使得斑块较细碎、景观稳定性差,故景观生态风险呈现出与建设用地扩展的正相关。

研究论证得到城市化是景观格局变化的诱导因素,明确了城市化与生态环境效应的内在联系。景观生态风险通过景观类型的空间形态直观反映了景观结构的稳定程度。在滇池流域内,建设用地斑块聚合的建成区景观生态风险小;而建成区边缘处斑块破碎,景观格局处于不稳定状态,是景观生态风险的重点防控区。因此,未来的城市建设要引导建设用地向中心城镇聚集;而“一主二副”的城市空间结构中,城市副中心的开发则应遵守集约紧凑、严控蔓延的原则,尽量形成具有适宜规模的组团式空间布局,以提升建设用地斑块的聚合度来增强景观格局的抗干扰能力。对于城市开发活动较少的自然生境区域,则应通过生态修复维护区域良好的林草格局。东川区、嵩明县局部由于存在多景观类型的混合分布,景观破碎和分离度大。因此,东川区应将控制水土流失作为生态保护任务,通过生态修复工程重建裸岩区域的灌草格局,遏制荒漠化;采取封山育林方式,改善土壤结构,培育大面积的林地斑块。嵩明县则应减少城市开发对耕地格局的破坏,避免高质量农田被侵占。

生态系统服务价值与景观类型的规模和配置紧密相关。滇池流域内的城市建成区挤占生态用地,而市域东北部、东南部受水土流失、石漠化等地理环境的限制,因此高生态系统服务功能的林地、水域斑块分散且规模较小,生态系统服务价值低。为避免城市规模快速扩大带来的生态系统服务价值下降等聚集不经济的现象,要控制新

区的建设规模,严控城市增量,盘活城市存量。其次,城市空间中要增加“蓝绿空间”,可通过丰富的景观加入(如建立街旁绿地、口袋公园等)提升城区的公共绿地规模和生态系统服务功能。对于中心城区的绿地,要提前做好绿地系统规划,保护生态廊道的连续。对于围绕滇池发展的城市空间,要预留适宜的生态缓冲带,减少岸线的硬化。最后,要做好长江上游生态屏障建设,通过加大天然林造林工程的实施力度增强市域北部生态系统的稳定性。

景观生态风险与生态系统服务价值反映了景观格局的不同特性,景观生态风险因其对生态安全的反面表征而具有较好的生态预警作用,生态系统服务价值则因正面表征生态安全对生态建设具有直观引导作用。然而,研究对二者定量的关联性、协同性的研究尚不深入;多风险因素的生态风险评价以及多尺度、多粒度景观格局下的生态环境效应模拟研究尚未展开,这些均将作为下一步的研究重点和方向。

#### [参 考 文 献]

- [1] 邬建国. 景观生态学: 概念与理论 [J]. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42-52.
- [2] 龙花楼, 曲艺, 屠爽爽, 等. 城镇化背景下中国农区土地利用转型及其环境效应研究: 进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(5): 455-463.
- [3] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 等. 城市空间扩展的生态环境效应研究: 以内蒙古呼和浩特市为例 [J]. *地理研究*, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [4] Hou Y, Li B, Müller F, et al. Ecosystem services of human-dominated watersheds and land use influences: a case study from the Dianchi Lake watershed in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(11): 652.
- [5] 赵丹阳, 佟连军, 仇方道, 等. 松花江流域城市用地扩张的生态环境效应 [J]. *地理研究*, 2017, 36(1): 74-84.
- [6] 李辉, 周启刚, 李斌, 等. 近30年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 654-666.
- [7] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [8] 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.
- [9] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风

- 险时空演变及其关联性[J].生态学报,2019,39(21):7815-7828.
- [10] 高星,刘泽伟,李晨曦,等.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J].生态学报,2020,40(20):7113-7122.
- [11] 林坚,刘松雪,付雅洁,等.西部欠发达地区乡镇土地利用生态效应评价研究:以甘肃省榆中县为例[J].城市发展研究,2017,24(2):113-121.
- [12] 王飞,叶长盛,华吉庆,等.南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系[J].生态学报,2019,39(4):1248-1262.
- [13] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- [14] 王晓玥,李双成.基于多维视角的“城市病”诊断及风险预估研究进展与发展趋势[J].地理科学进展,2017,36(2):231-243.
- [15] 高伟,杜展鹏,严长安,等.污染湖泊生态系统服务净价值评估:以滇池为例[J].生态学报,2019,39(5):1748-1757.
- [16] 王海帆,王军,吕态能.小流域生态环境建设的初步研究:以云南东川陶家小河流域为例[J].水土保持研究,2014,21(6):256-259.
- [17] 黄润秋,徐则民.西南典型城市环境地质问题与城市规划[J].中国地质,2007,34(5):894-906.
- [18] 史芳宁,刘世梁,安毅,等.城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究:以昆明市为例[J].生态学报,2020,40(10):3303-3314.
- [19] 王权,唐芳,李阳兵,等.岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异:以贵州省东北部槽谷为例[J].生态学报,2021,41(18):7273-7291.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [26] 庞敏.特大山地都市区景观格局变化及生态服务价值研究:以重庆市为例[D].重庆:重庆工商大学,2020.
- [27] 闫焱.昆玉一体化区域生态系统服务价值研究[D].昆明:云南大学,2019.
- [28] 昆明市自然资源和规划局.昆明市城市总体规划(2011—2020)[R/OL].(2022-05-30)[2022-06-05].<http://zrzygh.km.gov.cn/c/2022-05-30/4034392.shtml>.

(责任编辑 陆 驰)

