

DOI: 10.5846/stxb201903060425

刘珍环, 张国杰, 付凤杰. 基于景观格局-服务的景观生态风险评价——以广州市为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3295-3302.

Liu Z H, Zhang G J, Fu F J. Assessing landscape ecological risk based on landscape pattern and services in Guangzhou during 1990—2015. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3295-3302.

# 基于景观格局-服务的景观生态风险评价 ——以广州市为例

刘珍环<sup>1,\*</sup>, 张国杰<sup>2</sup>, 付凤杰<sup>1</sup>

1 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

2 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060

**摘要:**城市化对景观的结构和功能造成极大干扰,城市景观变化引起的生态风险受到城市生态建设的关注,但景观生态风险评价技术体系尚待深化,以促进风险防范决策。研究选取植被碳固定、土壤保持、水源涵养与提供和栖息地提供等景观服务改进景观脆弱度的评价方法,以广州市为案例研究区,评价了 1990—2015 年广州市城市景观生态风险及其时空变化特征。研究结果表明:(1)基于景观格局与服务的景观生态风险评价能够有效地评估城市景观生态风险的空间分布,但评价需要关注结果验证和辅助情景分析,方可作为景观生态风险的预警和预测提供科学依据。(2)1990—2015 年广州市的景观干扰度先增加后降低,2000 年是景观干扰度变化的转折点;25 年间,景观脆弱度不断增加,中脆弱度和高脆弱度比例之和维持在 60% 以上;2000 年是景观生态风险的转折点,1990—2000 年景观生态风险趋于增大,2000—2015 年景观生态风险趋向降低;景观干扰度、脆弱度和生态风险在空间上呈现南部高于北部,西部高于东部的分布特征。(3)近 25 年,广州市景观生态风险与景观变化具有较好的空间一致性。维持低风险的比例为 40.74%,基本都分布在北部山区,而维持高风险的比例为 6.67%,由低风险向高风险的转变比例为 32.28%,由高风险转变为低风险的比例为 20.31%。

**关键词:**景观格局;景观服务;城市景观生态风险;时空变化

## Assessing landscape ecological risk based on landscape pattern and services in Guangzhou during 1990—2015

LIU Zhenhuan<sup>1,\*</sup>, ZHANG Guojie<sup>2</sup>, FU Fengjie<sup>1</sup>

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2 Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

**Abstract:** Landscape ecological risk assessment (LERA) is an effective tool developed in recent years to support landscape ecological construction and management. The ecological risk caused by landscape change or land-use and land-cover change has received increased attention by policy-makers. High-intensity human activities disturbed the pattern and function of ecosystem and the hotspot of landscape change in urban areas, which contributed to the uncertainty of ecological risk. Therefore, it is urgent to improve the LERA method to provide quantitative analysis for landscape management and comprehensive risk prevention. There are several methods used for LERA such as landscape metrics and landscape source-sink risk. However, the classic model of traditional ecological risk assessment followed the mode of risk source identification-receptor analysis-exposure and hazard assessment. In order to improve the LERA method in urban areas, this research followed the landscape metrics method, but improved the algorithm of vulnerability for landscape services. A series

基金项目:国家自然科学基金项目(41571172)

收稿日期:2019-03-06; 网络出版日期:2020-04-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenhuanliu@gmail.com

of landscape services indicators were reselected to denote landscape vulnerability, including carbon storage, water provision and purification, soil conservation, and habitat quality. This study used multi-source data to analyze the spatio-temporal changes and characteristics of landscape ecological risk based on 1 km × 1 km spatial resolution in Guangzhou, a typical area experiencing rapid urbanization, for the period 1990—2015. The results were as follows: (1) LERA based on landscape pattern and landscape service can effectively evaluate the spatial distribution of urban landscape ecological risk. The low landscape ecological risk type is typical and these areas were regularly distributed over the 25 years. In the study stage, the year of 2000 was the transition period. (2) The landscape disturbance degree of Guangzhou increased first and then decreased over the 1990—2015 period; 2000 was the year when the degree of landscape disturbance changed. Landscape vulnerability is increasing. Together, medium vulnerability and high vulnerability areas accounted for more than 60% of the area; these areas were more common in the south than the north, and more common in the west than in the east. The landscape ecological risk in Guangzhou was increasing before 2000, and showed a tendency to decrease after 2000. (3) The landscape ecological risks transition showed that landscape changes and ecological risk have a good spatial consistency in Guangzhou during the 25-year study period. The area with a low landscape risk was 40.74%, and this area was mostly distributed in the northern mountainous areas. The area with a high landscape risk was 6.67%, the transition from low risk to high risk was 32.28%, and high risk change to low risk was 20.31%. This shows that landscape changes in urban area has a high risk after rapid urbanization. However, the uncertainty of LERA still plagued the application of LERA in policy-making. Further research can pay more attention to the verification of assessment results or use scenario analysis to quantify spatiotemporal characteristics of risk to improve the scientific basis for the early warning and prediction of landscape ecological risk. Then, the LERA applications in urban areas can be acceptable for landscape management or policy-making.

**Key Words:** landscape pattern; landscape services; urban landscape ecological risk; spatiotemporal changes

景观生态风险评价是近年来为支持景观生态建设和管理而发展起来的有效工具,景观变化引起的生态风险愈来愈受到研究者和管理者的重视<sup>[1]</sup>。城市是景观变化的热点地区,高强度的人类活动对生态系统的结构和功能造成极大干扰<sup>[2]</sup>,因此,完善景观生态风险评价方法可为景观管理和综合风险防范提供定量依据<sup>[3]</sup>。景观生态风险评价研究关注对特定区域景观组分、结构、功能和过程所受人類活动或自然灾害的影响进行判定或预测,特别关注城市化、土地利用和气候变化下的景观生态风险<sup>[4-5]</sup>。基于景观格局与生态过程的互馈作用视角评价景观生态风险,可以揭示景观对风险来源的空间影响和应对措施<sup>[6-7]</sup>。

生态风险评价研究受地理学研究生态化和生态学研究宏观化的影响,从生态系统尺度迅速扩展到景观尺度,评价对象由单一类型生态系统扩展到多种生态系统的空间镶嵌体<sup>[8]</sup>。作为生态风险评价的重要分支,景观生态风险评价方法尚待进一步改进<sup>[9]</sup>,特别是评价尺度变化导致生态风险评价在景观尺度上比生态系统尺度更难确定胁迫因子,而又比区域尺度更强调空间异质性,因此更关注景观的综合风险<sup>[10-11]</sup>。景观生态风险评价常用风险源汇法和景观指数法,两种方法都遵循概率乘以损失的风险表征范式;景观风险源汇法关注区域内具有明确胁迫因子的特定生态风险<sup>[12]</sup>,但多因子景观生态风险叠加的复杂函数关系并不清晰,难以区分不同因子间风险的相互影响;景观指数法关注景观镶嵌体相对于最优格局的偏离程度的生态风险效应<sup>[13-15]</sup>。景观生态风险评价强调景观格局对风险的定量影响,通常将格局纳入评价要素,而将损失看作社会经济过程的结果,忽略了景观格局与生态过程和生态风险之间的逻辑关系<sup>[16]</sup>,评价实际操作过程中社会经济脆弱度往往只能通过专家打分等主观方式开展,难以评估其不确定性。为避免景观生态风险评价单纯运用景观格局指数计算和堆砌<sup>[17]</sup>,需要引入新的评价体系量化脆弱度。生态系统服务是连接景观格局与过程的有效途径,也是连接人类福祉和社会—自然复合生态系统的桥梁,其脆弱性与景观功能密切相关<sup>[18-20]</sup>。生态系统服务的时空异质性最能体现景观格局与生态过程的最终后果,是定量景观脆弱度的最佳指示指标,将其纳入景观生态风险评价模型量化脆弱度,可以进一步对区域进行风险评估<sup>[6]</sup>。

城市是复杂的社会-自然复合生态系统<sup>[21]</sup>,其景观生态风险的特点是多来源和多受体的复杂暴露和干扰,自然景观与人工景观的相互作用及其带来的风险在城市高概率地综合涌现,亟待建立景观生态风险评价及预警体系<sup>[22-24]</sup>。广州市是华南地区的核心城市,在过去几十年经历了快速城市化过程,已成为我国典型的大都市地区之一,该区域的生态保护与城市扩张的权衡是难点,洪水、热浪、水土流失、台风等自然灾害对自然生态系统和居民健康造成较大风险,亟需探寻以景观为基础的应对生态风险的适应方案。研究该城市的景观生态风险及其变化特征,可为城市景观生态建设及国土空间规划提供参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 数据源

研究采用的数据包括中分辨率遥感影像数据、数字地形数据、土壤粗砂含量、粉砂含量、有机碳含量数据、广东省气温和降水产品等数据集,主要数据来源见表1。采用中分辨率遥感数据,经大气校正、几何校正、图像增强等预处理,采用最大似然监督分类和目视修正相结合的方法,将广州市分为农地、林地、城建、水体、草地和湿地六类景观类型。1990—2015年各期的整体精度介于85.33%—93.51%,Kappa系数介于0.81—0.93。

表1 数据源及说明

Table 1 Data source and description

数据类型 Data type	数据内容 Data context	数据来源 Data source
遥感数据 Remote sensing data	Landsat TM 数据 (1990/12/24, 1995/12/30, 2001/03/01, 2005/07/18, 2009/11/02, R/L:122044) OLI 数据 (2014/11/16, R/L:122044) MODIS-NDVI 数据 (2001—2015年,分辨率 500 m)	地理空间数据云数据共享平台 <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
气象数据 Meteorological data	1990—2015年气温数据、降水量数据	广州市气象局网站 <a href="http://www.gz121.gov.cn/">http://www.gz121.gov.cn/</a> 1990—2015年广州市统计年鉴
植被类型数据 Vegetation type data	广州市植被类型数据	中国植被类型数据集 (1:100万)
地形及土壤数据 Topographic and soil data	DEM 数据;土壤粗砂含量、粉砂含量、有机碳含量数据	地理空间数据云数据共享平台 <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> 国家地球系统科学数据共享平台 <a href="http://loess.geodata.cn/">http://loess.geodata.cn/</a> 寒区旱区科学数据中心 <a href="http://westdc.westgis.ac.cn/">http://westdc.westgis.ac.cn/</a>

### 1.2 景观生态风险评价模型

研究改进基于景观指数评价方法的景观生态风险模型,以景观格局指数表征景观干扰度,引入生态系统服务相关指标量化景观脆弱度,相关评价模型如下:

$$LER_k = \sum_i^N (R_{k,i} \times \frac{A_{k,i}}{A_k}) \times V_k \quad (1)$$

式中,  $LER_k$  表示风险评价单元  $k$  的景观生态风险,  $R_{k,i}$  为风险评价单元  $k$  中景观类型  $i$  的景观干扰度;  $V_k$  为风险评价单元  $k$  的景观脆弱度;  $i$  为景观类型;  $N$  为景观类型数;  $A_{k,i}$  表示风险评价单元  $k$  中景观类型  $i$  的面积;  $A_k$  表示景观生态风险评价单元  $k$  的总面积。

景观干扰度指数 ( $R_{k,i}$ ) 反映了景观格局变化造成的潜在生态损失和风险,研究运用风险制图方法,将风险小区定为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  网格,其计算公式如下:

$$H_{k,i} = aC_{k,i} + bN_{k,i} + cD_{k,i} \quad (2)$$

$$R_{k,i} = \frac{H_{k,i} - \min(H_{k,i})}{\max(H_{k,i}) - \min(H_{k,i})} \quad (3)$$

式中,  $H_{k,i}$  为风险评价单元  $k$  中景观类型  $i$  的景观干扰度,  $C_{k,i}$ 、 $N_{k,i}$  和  $D_{k,i}$  分别是风险评价单元  $k$  中景观类型  $i$  的景观破碎度、景观分离度和景观优势度,在 Fragstats 4.2 软件中运用移动窗完成,  $a$ 、 $b$  和  $c$  是各个景观格局

指数的权重,公式内容及意义详见参考文献<sup>[25-26]</sup>。参考他人研究<sup>[27-29]</sup>,结合城市景观变化的特点,分别赋以景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数的权重为 0.6、0.3 和 0.1。

景观脆弱度指数( $V_{k,i}$ )在以往研究中采用生境脆弱性<sup>[30]</sup>或专家打分法<sup>[31]</sup>确定,景观脆弱度越高,则景观功能越弱,景观对于各种干扰就越敏感,抵抗干扰的能力也越弱。采用基于净初级生产力(Net Primary Production, NPP)的植被碳固定、土壤保持、水源涵养与提供和栖息地提供等生态系统服务评价景观脆弱度<sup>[32]</sup>,计算公式如下:

$$VZ_k = VC_k + VS_k + VW_k + VH_k \quad (4)$$

$$V_k = \frac{\max(VZ_k) - VZ_k}{\max(VZ_k) - \min(VZ_k)} \quad (5)$$

$$VC_k = NPP \times (1 - VC_{npp}) \quad (6)$$

$$VS_k = NPP \times (1 - VC_{npp}) \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \quad (7)$$

$$VW_k = NPP \times (1 - VC_{npp}) \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \quad (8)$$

$$VH_k = NPP \times (1 - VC_{npp}) \times F_{pre} \times F_{tem} \times D \quad (9)$$

式中, $VZ_k$ 为风险评价单元 $k$ 的生态系统服务值, $VC_k$ 为风险评价单元 $k$ 的植被碳固定量; $VS_k$ 为风险评价单元 $k$ 的土壤保持能力; $VW_k$ 为风险评价单元 $k$ 的水源涵养与提供量; $VH_k$ 为风险评价单元 $k$ 的栖息地提供量;NPP:植被净初级生产力; $VC_{npp}$ :NPP年内稳定性因子; $K$ :土壤侵蚀因子; $F_{slo}$ :坡度因子; $F_{sic}$ :土壤入渗能力因子; $F_{pre}$ :年均降水量因子; $F_{tem}$ :年均气温因子; $D$ :地表粗糙度因子。NPP计算采用光能利用率模型(CASA模型),其中NDVI数据采用两种数据产品,2005,2010和2015年采用500 m分辨率的MODIS-NDVI数据;1990,1995和2000年采用Landsat TM计算的NDVI值并重采样至500 m分辨率。将景观生态风险值归一化并制图,按照自然断点法<sup>[26,33]</sup>将风险等级划分为极低风险区、低风险区、中风险区和高风险区四级。

## 2 结果分析

### 2.1 景观干扰度分布及变化

广州市景观格局干扰度空间分布显示(图1),广州市景观干扰度高值区主要分布在中部、南部和西部,低值区则集中于北部和东北部,表明广州市景观格局所受干扰强度南部大于北部、西部大于东部。从时序上看,2000年是景观干扰度变化的转折点,1990—2000年,景观干扰度逐渐增强,中干扰度和高干扰度占比之和由28.16%上升至48.39%,南部干扰度上升最明显,西部和东南部干扰度也有一定的上升趋势;2000—2015年,景观干扰度表现出下降的趋势,到2015年,中干扰度和高干扰度比例之和降为31.13%,北部和南部干扰均有降低。1990—2015年,低和极低干扰度比例之和由71.84%变为68.87%,等级占比相差不大,但空间分布趋于破碎化。25年间,景观干扰度经历了先增加后减小的过程,这与城市扩张由粗放转为精细,注重城市内部结构调整有关。

### 2.2 景观脆弱度分布及变化

由图2可以看出,1990—2015年,广州市景观功能脆弱度逐渐上升,中脆弱度和高脆弱度占比之和均维持在60%以上,高脆弱度比例增加明显。空间分布整体表现为南部高于北部,西部高于东部,高脆弱度地区集中在南部,中脆弱度地区广泛分布于北部和东北部,低脆弱度和极低脆弱度地区聚集在广州市北部区域的行政边界交界带附近,以山地丘陵为主。近25年,景观脆弱度一直维持在较高水平,表明城市发展显著降低了中心城区生态系统服务能力,也削弱了建成区周边景观的抗干扰能力。

### 2.3 景观生态风险分布特征

图3展示的是1990—2015年广州市景观生态风险空间分布,景观生态风险表现为南部高于北部、西部高于东部。总体上广州市以低风险和极低风险区为主,中风险区和高风险区有所增加,25年间,中风险区增长

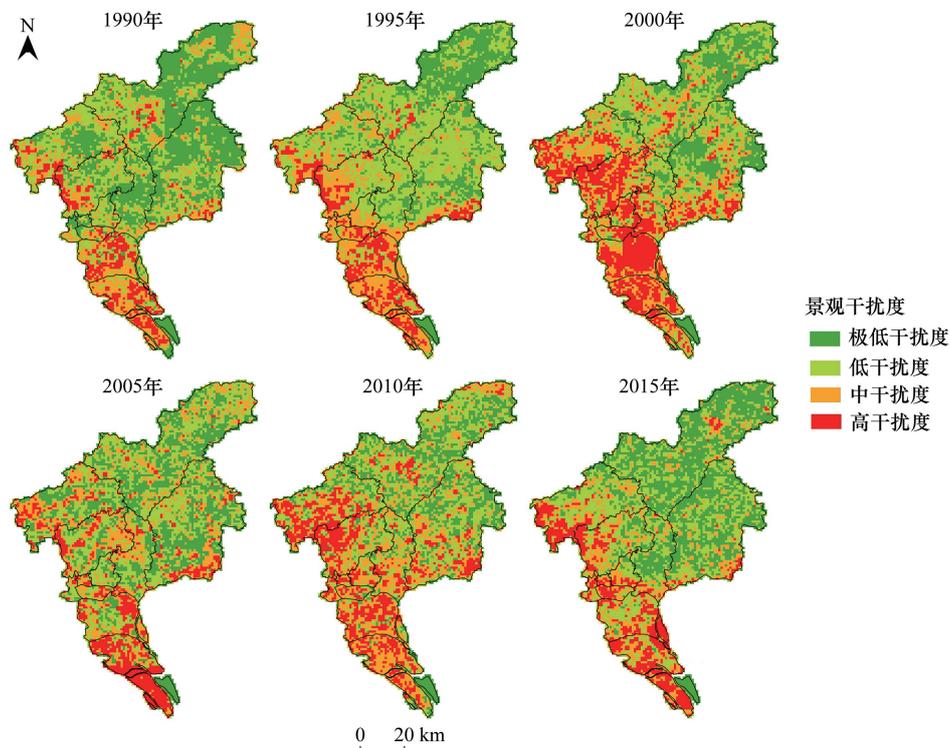


图 1 1990—2015 年广州市景观干扰度空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of landscape disturbance in Guangzhou during 1990—2015

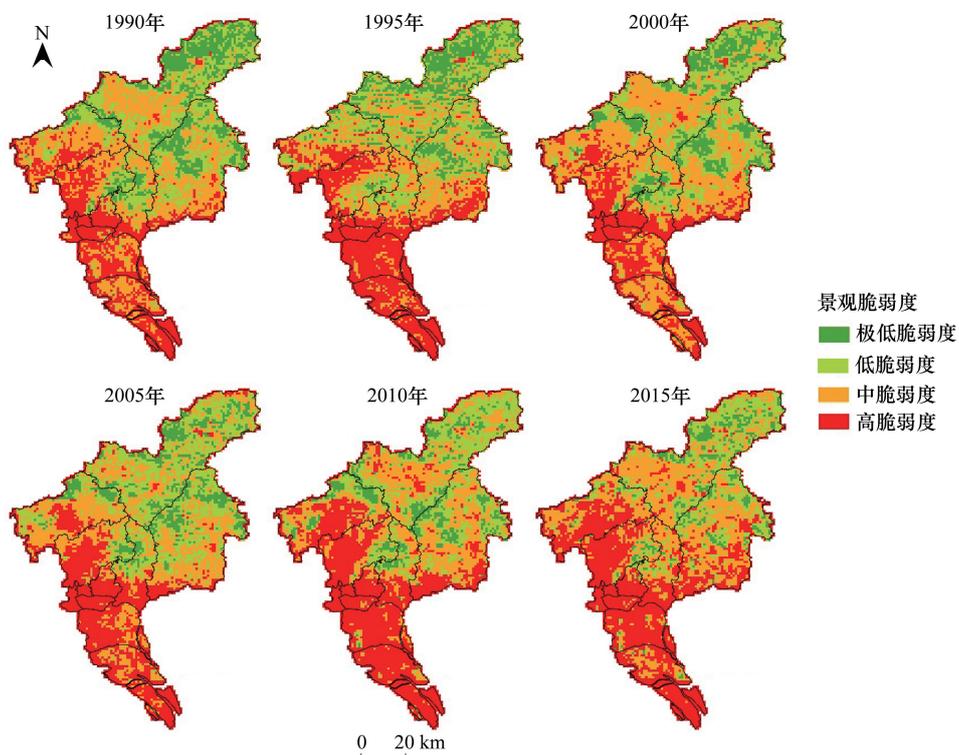


图 2 1990—2015 年广州市景观脆弱度空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of landscape vulnerability in Guangzhou during 1990—2015

幅度为 5.78%, 高风险区变化幅度超过 50%, 说明景观变化主要造成高风险的提升。2000 年是广州市景观生态风险的转折点, 前 10 年风险趋于增大, 后 15 年风险趋向降低。低风险和极低风险区占比最大为 1990 年的 76.52%, 最小为 2000 年的 55.16%。极低风险区景观以大斑块林地为主, 主要分布在与天河、白云和黄埔交界的白云山区以及增城和从化; 低风险区景观以农业用地和林地为主, 少量草地和滩涂湿地。中风险区的整体变化趋势表现为 2000 年最高, 占 25.24%, 覆盖范围主要是城市建成区及城郊建设用地区、农业景观分布区。高风险区在 2000 年比较突出, 占比 19.61%, 主要分布在南沙万顷沙、番禺与南沙交界带、番禺与海珠交界带、白云区和花都区的城乡交错带, 是城市蔓延的主轴, 少量分布在荔湾和天河等地的城市开发建设区, 如荔湾的广钢新城、天河区东部, 还有少量分布在湿地滩涂景观中。

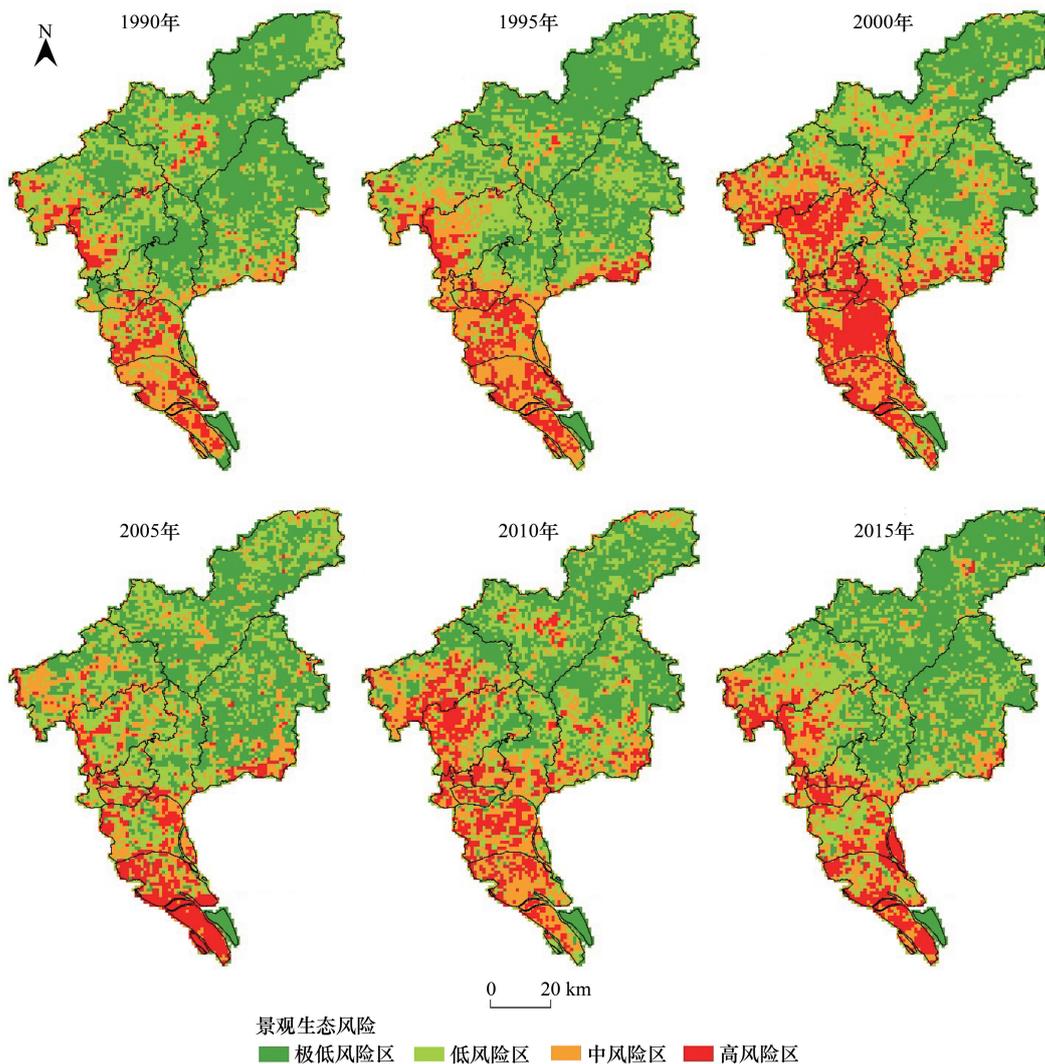


图 3 1990—2015 年广州市景观生态风险空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of landscape ecological risk in Guangzhou during 1990—2015

#### 2.4 景观生态风险变化特征

运用变化分析可以看出(图 4), 近 25 年, 广州市景观生态风险保持低风险(低和极低风险)以下的比例为 40.74%, 基本都分布在北部山区。高风险(中高风险)的比例维持在 6.67%, 主要分布在南部的番禺和南沙。由低风险向高风险的转变比例为 32.28%, 分布在城市边缘带和城乡交错带, 包括花都、白云、从化、增城、天河北部和番禺中心区。由高风险转变为低风险的比例为 20.31%, 主要分布在主城区荔湾、海珠、越秀和天河南

部,这 25 年间景观生态风险的变化反映了景观城市化的影响。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 主要结论

本研究基于景观干扰度与脆弱度的景观生态风险评价体系,引入生态系统服务改进脆弱度的评价方法,选取植被碳固定、土壤保持、水源涵养与提供和栖息地提供等 4 种生态系统服务,通过定量表征脆弱度,构建快速城市化地区的城市景观生态风险评价模型。采用 1990—2015 年广州市的多源数据,分析了城市景观生态风险的时空格局及变化特征,基本结论如下:

(1) 25 年间,景观干扰度经历了先增加后降低的过程,2000 年是景观干扰度变化的转折点;1990—2015 年,景观脆弱度不断增加,抗干扰能力下降,中脆弱度和高脆弱度占比之和均维持在 60% 以上。景观干扰度和景观脆弱度在空间分布上均表现为南部高于北部,西部高于东部。

(2) 1990—2015 年广州市景观变化明显,景观生态风险时空格局呈现出一定的规律性,表现为南部高于北部、西部高于东部,以低风险和极低风险为主。2000 年是广州市景观生态风险的转折点,1990—2000 年间景观生态风险趋于增大,2000—2015 年间景观生态风险趋向降低。

(3) 近 25 年,广州市景观生态风险与景观变化具有较好的空间一致性。低风险区比例保持在 40.74% 左右,基本都分布在北部山区,而高风险的比例维持在 6.67%,由低风险向高风险的转变比例为 32.28%,由高风险转变为低风险的比例为 20.31%,反映了 25 年间景观城市化对景观生态风险的影响。

#### 3.2 问题讨论

景观变化引起的生态风险一直以来重点关注景观格局导致的生态风险,对于景观功能的易损特质未受到足够的重视。本研究尝试性将生态系统服务引入表征景观功能的脆弱性,用于评价快速城市化过程中的景观生态风险,改进基于景观指数的景观生态风险评价方法。从评价结果看,引入生态系统服务比单纯的景观格局指数法更容易刻画城市景观变化引起的风险,也更容易空间化景观生态风险,减少了主观定量过程,提升了生态风险制图及评价的可信度。然而,以下两点仍需要景观生态风险评价研究进一步关注:(1) 景观生态风险评价结果缺少验证,降低了景观生态风险评价结果的可靠性。(2) 风险的随机性和不稳定性决定了难以圈定特定的防范区。例如广州市主要的景观生态风险防范应在南部中心六区和西部的白云和花都区,然而这种景观变化带来的风险会随着景观变化而变化,只能表征当下景观生态风险,不能够预测和预警未来的景观生态风险。为此,需要通过时序变化来探寻景观生态风险的演变规律,再辅助以情景变化,方可为景观生态风险的具体应用提供基础。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 曹祺文,张曦文,马洪坤,吴健生. 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. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [ 2 ] USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). EPA/630/R- 95/002F Guidelines for ecological risk assessment. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [ 3 ] 张甜,刘焱序,彭建,王仰麟. 深圳市景观生态风险多尺度关联分析. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2478-2486.

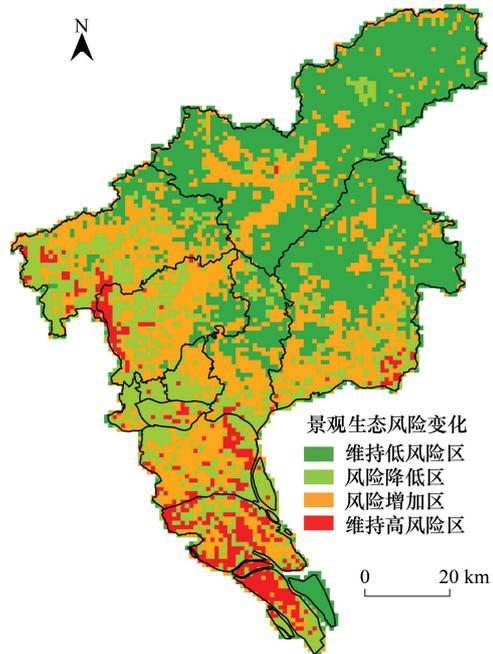


图 4 1990—2015 年广州市景观生态风险变化图

Fig.4 Spatial distribution of landscape ecological risk changes in Guangzhou during 1990—2015

- [ 4 ] Landis W G. Twenty years before and hence; Ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2003, 9(5): 1317-1326.
- [ 5 ] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 彭建. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1041-1051.
- [ 6 ] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [ 7 ] Mortberg U M, Balfors B, Knol W C. Landscape ecological assessment: a tool for integrating biodiversity issues in strategic environmental assessment and planning. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(4): 457-470.
- [ 8 ] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [ 9 ] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. *地理学报*, 2019, 74(3): 432-445.
- [ 10 ] 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 城市生态风险评价研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 911-918.
- [ 11 ] 吕永龙, 王生辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370.
- [ 12 ] 王金亮, 谢德体, 邵景安, 倪九派, 雷平. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地地面源污染源—汇风险识别. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 206-215.
- [ 13 ] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 高彦净. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 2153-2160.
- [ 14 ] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [ 15 ] 王飞, 叶长盛, 华吉庆, 李欣. 南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系. *生态学报*, 2019, 39(4): 1248-1262.
- [ 16 ] Liu Y X, Peng J, Zhang T, Zhao M Y. Assessing landscape eco-risk associated with hilly construction land exploitation in the southwest of China: trade-off and adaptation. *Ecological Indicators*, 2016, 62: 289-297.
- [ 17 ] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 胡晓旭. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡——以大理白族自治州为例. *地理学报*, 2015, 70(11): 1747-1761.
- [ 18 ] Faber J H, van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 3-8.
- [ 19 ] Nienstedt K M, Brock T C M, van Wensem J, Montforts M, Hart A, Aagaard A, Alix A, Boesten J, Bopp S K, Brown C, Capri E, Forbes V, Köpp H, Liess M, Luttik R, Maltby L, Sousa J P, Streissl F, Hardy A R. Development of a framework based on an ecosystem services approach for deriving specific protection goals for environmental risk assessment of pesticides. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 31-38.
- [ 20 ] 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析. *资源科学*, 2010, 32(2): 303-308.
- [ 21 ] Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2008.
- [ 22 ] Li J L, Pu R L, Gong H B, Luo X, Ye M Y, Feng B X. Evolution characteristics of landscape ecological risk patterns in coastal zones in Zhejiang Province, China. *Sustainability*, 2017, 9(4): 584.
- [ 23 ] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.
- [ 24 ] 李杨帆, 林静玉, 孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用. *地理研究*, 2017, 36(3): 485-494.
- [ 25 ] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 高彦净. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2041-2048.
- [ 26 ] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 王晓蕊, 郑德凤. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估. *生态学报*, 2018, 38(16): 5952-5960.
- [ 27 ] 高宾, 李小玉, 李志刚, 陈玮, 何兴元, 齐善忠. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. *生态学报*, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [ 28 ] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力. *生态学报*, 2018, 38(11): 3729-3740.
- [ 29 ] 田鹏, 李加林, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2697-2706.
- [ 30 ] Gong J, Yang J X, Tang W W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14192-14215.
- [ 31 ] 李谢辉, 李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析——以渭河下游河流沿线区域为例. *干旱区研究*, 2008, 25(6): 899-903.
- [ 32 ] 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 董治宝, 李英杰, 曾源, 吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. *地理学报*, 2016, 71(5): 768-780.
- [ 33 ] 郭燕燕. 快速城市化地区景观生态安全分析——以深圳市为例. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(12): 127-131.