

广州市生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性分析

朱子文

广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州

收稿日期: 2023年11月1日; 录用日期: 2023年12月18日; 发布日期: 2023年12月28日

摘要

随着城市化进程的不断发展, 过度地开采和资源的不合理利用导致生态环境不断恶化, 加剧了生态系统服务功能的退化, 生态风险不断攀升。鉴于近20年广州市经济增长突出, 人地矛盾加剧, 本文以遥感和地理信息系统技术为基础, 基于双变量空间自相关模型, 以2 km*2 km的评价单元格为基础, 对2000年、2010年、2020年三期广州市的土地利用数据计算20年来广州市的生态系统服务价值、生态风险指数以及两者之间的相关性。2000年至2020年生态系统服务价值由249.32亿元降至224.16亿元, 减少了10.09%, 生态风险的面积20年来增加了14.77%, 且生态风险指数上升的速度越来越快, 研究表明广州市的生态质量持续下降且速率不断增长。

关键词

生态系统服务价值, 生态风险指数, 相关性, 广州市

Spatiotemporal Change and Correlation Analysis of Ecosystem Service Values and Ecological Risk in Guangzhou

Ziwen Zhu

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Nov. 1st, 2023; accepted: Dec. 18th, 2023; published: Dec. 28th, 2023

Abstract

With the continuous development of urbanization, excessive exploitation and irrational use of re-

sources have led to the continuous deterioration of the ecological environment, aggravated the degradation of ecosystem service functions, and escalated ecological risks. Considering the outstanding economic growth of Guangzhou in the past 20 years, the contradiction between people and land has intensified, based on remote sensing and geographic information system (GIS) technology, this paper calculates the value of ecosystem services, the ecological risk index and the correlation between them in Guangzhou over the past 20 years by using the land use data of Guangzhou in the three periods of 2000, 2010, and 2020, and based on the evaluation unit grid of 2 km*2 km. The value of ecosystem services from 2000 to 2020 decreased from 24.932 billion yuan to 22.416 billion yuan, a decrease of 10.09%, the area of ecological risk increased by 14.77% in 20 years, and the ecological risk index increased more and more rapidly, the study shows that the ecological quality of Guangzhou City continues to decline and the rate is increasing.

Keywords

Ecosystem Service Value, Ecological Risk Index, Correlation, Guangzhou

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的不断发展[1], 过度的开采和资源的不合理利用导致生态环境不断恶化, 加剧了生态系统服务功能的退化, 生态风险不断攀升[2]。由于人口的急剧扩张和经济的快速增长, 人们对自然资源的需求也不断膨胀, 对自然资源的开采力度越来越大[3], 因此, 原始的自然环境被大力破坏, 土壤、水资源被污染, 林地被大肆砍伐, 给人类的生存和可持续发展造成了严重的威胁[4]。金山银山就是绿水青山, 可持续发展[5] [6] [7]、环境保护[8] [9]、资源利用[10] [11]等相关问题成为了全球研究的一大热点。

生态系统服务价值和生态风险是评价生态系统质量的两个指标, 可以从一定程度上反映出生态系统的安全水平。生态系统服务指的是生态系统及其物种组成用以满足和维持人类生存、生活的条件和过程。生态风险是生态系统及其组成部分对外部干扰做出退化反映的可能性, 指一定区域内具有不确定性的事故或灾害对生态系统的结构和功能可能产生的不利影响。生态风险评价是对生态环境状况未来发展变化的预判, 是风险控制的前提, 从反面表征区域生态安全状况。

曹祺文[12]等从地形、人为威胁、生态系统恢复能力等角度提出了一个以生态系统服务为基础的景观生态风险评价框架; 李俊翰[13]等使用灰色关联分析模型以及双变量空间自相关模型来研究生态系统服务价值和生态风险时空演变之间的关联性; 李辉[14]等基于双变量空间自相关模型对三峡库区生态系统服务价值和生态风险之间的关系进行分析。由此可见, 生态系统服务价值与生态风险评价的研究逐渐呈现出相互融合的趋势。

本文以 Globe Land30 的土地利用数据, 参考卫星影像进行重分类, 得到 2000 年、2010 年、2020 年三期广州市土地利用现状数据, 并从生态系统服务价值和生态风险的两个方面对广州市的生态系统进行时空分析, 并且对两者之间的相关性进行了研究。

2. 研究方法 with 数据源

2.1. 研究区概况

广州市是广东省的省会城市, 广东省政治、经济、科技、教育和文化的中心, 粤港澳大湾区、泛珠江

三角洲经济区的核心城市以及一带一路的枢纽城市，我国重要的国家中心城市、国际商贸中心和综合交通枢纽等。广州市位于广东省中南部、珠江三角洲中北缘，西江、北江、东江三江汇合处，濒临南海，接近珠江流域下游入海口。其范围是东经 $112^{\circ}57' \sim 114^{\circ}03'$ ，北纬 $22^{\circ}26' \sim 23^{\circ}56'$ ，总面积约为 7434.4 km^2 (图 1)。

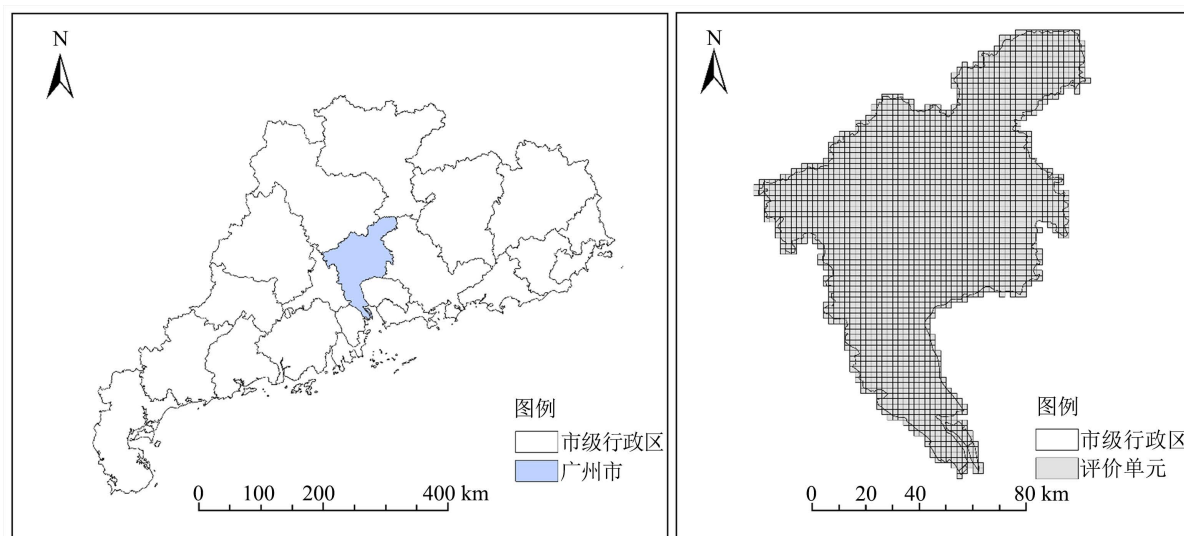


Figure 1. Study area and evaluation unit division

图 1. 研究区及评价单元划分图

2.2. 数据来源及处理

2.2.1. 数据来源

基础数据为 Globe Land30 (<http://globeland30.org/>)所提供的 30 m 土地利用数据,所使用的矢量行政区数据来自于地理国情检测云平台(<http://www.dsac.cn/>)。其他基础数据来自历年的广州市统计年鉴、广东省统计年鉴以及广东省粮食和物资储存局,相关数据经过基础数据计算得到。

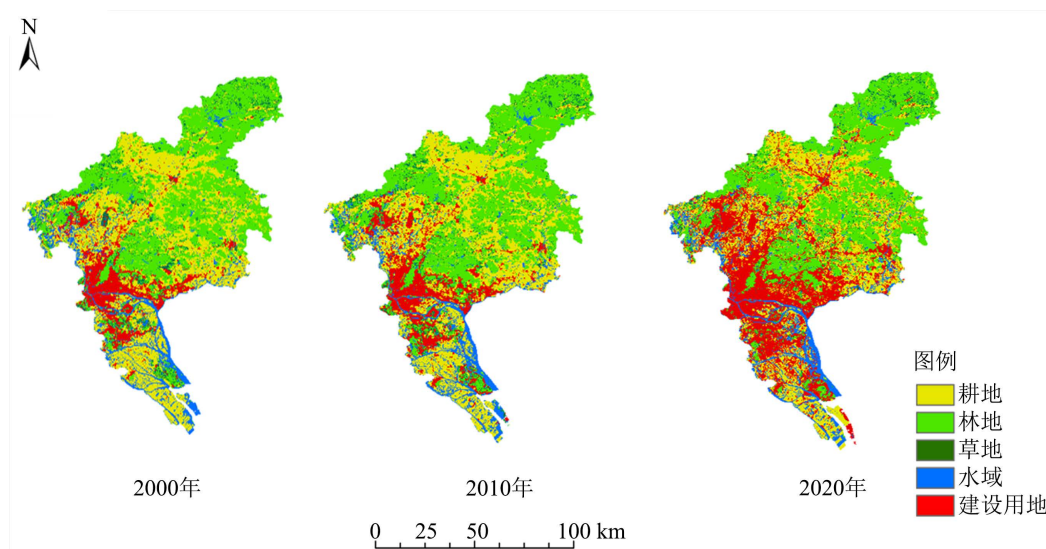


Figure 2. Land use map of Guangzhou from 2000 to 2020

图 2. 2000 年~2020 年广州土地利用图

2.2.2. 数据处理

Globeland30 的土地利用数据将土地利用类型分为水体、湿地、人造地表、苔原、冰川和永久积雪、草地、裸地、耕地、灌木地、森林十个类型。研究区内包括水体、湿地、人造地表、草地、耕地、灌木地、森林七个土地利用类型。为了便于研究,依据遥感卫星影像,在此基础上将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类,得到空间分辨率为 30 m 的 2000 年、2010 年、2020 年三期广州市土地利用数据(图 2)。

利用 ArcGIS 软件,将研究区划分为 2 km*2 km 的单元网格,得到 2027 个评价单元(图 1)。并以划分出的评价单元为基础,结合下述的研究方法,使用中心点赋值法并进行克里金插值对研究区的生态特征进行时空分析。

2.3. 研究方法

2.3.1. 生态系统服务价值模型

基于谢高地[15] [16]等学者 2015 年的“单位面积生态系统服务价值当量表”,依据广州市的地理位置和自然状况条件,对广州市生态系统服务价值当量进行确定与计算,得到广州市的当量系数表。在当量系数表的基础上可对广州市生态系统服务价值进行计算。公式为:

$$ESV = \sum(A_k + VC_k) \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum(A_k + VC_{fk}) \quad (2)$$

ESV 为生态系统服务价值; A_k 为第 k 类地类面积; VC_k 为第 k 类地类单位面积的生态系统服务价值系数; ESV_f 为生态系统第 f 项服务功能价值; VC_{fk} 是土地利用类型 k 的第 f 项服务功能价值系数; k 为土地利用类型。

根据参考文献[17],依据广州市的实际情况对生态系统服务价值当量系数表进行修正:据广州市统计年鉴中水田与旱地面积之比进行加权计算出耕地的系数;广州市的林种绝大部分为常绿阔叶林,所以林地采用阔叶林的系数;草地采用草原的系数;水域采用水系和湿地的系数平均值;建设用地的系数为 0;未利用地采用荒漠的系数。得到广州市生态系统服务价值当量系数表(表 1):

Table 1. Correction coefficient of equivalent factor in Guangzhou
表 1. 广州市当量因子表修正系数

一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	0.29	0.10	1.29	0.66	0.00	0.01
	原材料生产	0.66	0.14	0.13	0.37	0.00	0.03
	水资源供给	0.34	0.08	-2.25	5.44	0.00	0.02
调节服务	气体调节	2.17	0.51	1.05	1.34	0.00	0.11
	气候条件	6.50	1.34	0.54	2.95	0.00	0.10
	净化环境	1.93	0.44	0.16	4.58	0.00	0.31
	水文调节	4.74	0.98	2.37	63.24	0.00	0.21
支持服务	保持土壤	2.65	0.62	0.16	1.62	0.00	0.13
	养分循环	0.20	0.05	0.18	0.13	0.00	0.01
	维持生物多样性	2.41	0.56	0.20	5.21	0.00	0.12
文化服务	提供美学景观	1.06	0.25	0.09	3.31	0.00	0.05

基于广州市统计年鉴数据,求得广州市 2000~2020 年平均粮食产量为 5159.52 kg/hm²,基于广东省粮食和物资储存局公开的资料(2020 年 6 月,广东省稻谷批发价 2.61 元/kg,小麦批发价元 2.72/kg,玉米批发价元 2.2/kg),基于这三种粮食的批发价平均值,得到广东省 2020 年粮食批发价格 2.51 元/kg。以此为参考,确定广州市一个生态系统服务价值当量因子为 1848.83 元/hm²。以此计算得到广州市生态系统单位面积生态服务价值表(表 2):

Table 2. Coefficients of the ESV in Guangzhou (yuan/hm²)

表 2. 广州市单位面积生态系统服务价值

一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	536.16	184.88	2378.02	1210.98	0	18.49
	原材料生产	1220.23	258.84	249.29	674.82	0	55.46
	水资源供给	628.6	147.91	-4153.76	10057.61	0	36.98
调节服务	气体调节	4011.95	942.9	1934.53	2468.18	0	203.37
	气候条件	12017.37	2477.43	997.67	5444.79	0	184.88
	净化环境	3568.23	813.48	295.58	8458.38	0	573.14
	水文调节	8763.44	1811.85	4373.64	116910.51	0	388.25
支持服务	保持土壤	4899.39	1146.27	291.25	2995.1	0	240.35
	养分循环	369.77	92.44	332.56	231.1	0	18.49
	维持生物多样性	4455.67	1035.34	366.86	9632.38	0	221.86
文化服务	提供美学景观	1959.76	462.21	158.37	6119.61	0	92.44
	总计	42430.56	9373.55	7224.02	164203.48	0	2033.71

2.3.2. 土地利用生态风险指数模型

不同的土地利用类型有不同的生态系统服务价值,一般是建设用地的服务价值较低,而农田、水域等的服务价值较高。各评价单元的不同土地利用类型的组合以及占比会影响该评价单元的生态风险情况。基于此,参考已有研究成果[18],根据评价单元内土地利用类型的不同及其面积占比,构建土地利用生态风险指数(Ecological Risk Index, ERI),并以此评价广州市各评价单元的生态系统的风险,公式为:

$$ERI_a = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ai}}{S_i} C_i \quad (3)$$

ERI_a 为第 a 个评价单元格内土地利用生态风险指数值; S_{ai} 为第 a 个评价单元格内土地利用类型 i 面积; C_i 为第 i 类土地利用类型的生态风险强度参数。

生态风险强度参数反映生态系统抵御外部破坏的能力,依据土地利用类型进行排序,各土地利用类型的稳定性由小到大依次为:建设用地 < 未利用地 < 耕地 < 草地 < 水域 < 林地,通过归一化处理[19][20]得到各土地利用类型的生态风险强度参数分别为:耕地: 0.1471、林地 0.0454、草地: 0.1113、水域: 0.0772、建设用地: 0.3965、未利用地: 0.2225。

2.3.3. 双变量空间自相关模型

空间自相关模型能够反映某种因素在空间位置的相关程度,分为全局空间自相关和局部空间自相关。为了探究生态系统服务价值和生态风险的空间相关特征,采用双变量空间分析模型[21][22],利用全局自相关系数 Moran's I 指数反映整体空间关联和差异状况,公式如下:

$$I_{sr} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{y_{i,s} - \bar{y}_s}{\sigma_s} \right) \left(\frac{y_{i,r} - \bar{y}_r}{\sigma_r} \right)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (4)$$

I_{sr} 为单位面积生态系统服务价值 s 和生态风险指数 r 的双变量全局自相关系数； $y_{i,s}$ 和 $y_{i,r}$ 为第 i 个评价单元单位面积生态系统服务价值和生态风险指数； σ_s 和 σ_r 为方差。

为了全面具体地反映研究区各部分之间的空间关联性，采用 LISA 进行局部空间自相关分析，以表述局部集聚和离散效应。依据空间分布关系将空间关联性具体划分为高高聚集(H-H)、高低聚集(H-L)、低高聚集(L-H)以及低低聚集(L-L) 4 种集聚类型。

3. 结果分析

3.1. 生态系统服务价值时空变化分析

利用 ArcGIS10.2，结合广州市生态系统单位面积生态服务价值表，得到 2000 年~2020 年广州市各土地利用类型生态系统服务价值结构及变化率表(表 3)。通过对表 3 分析可得，广州市 2000 年~2020 年生态系统服务价值由 249.32 亿元降至 224.16 亿元，减少了 10.09%。研究区内各土地利用类型的生态系统服务价值占由小到大为：建设用地、未利用地、草地、耕地、水域、林地。研究区内，耕地的生态系统服务价值持续减少，林地和草地的生态系统服务价值呈现先增后减的趋势，水域的生态系统服务价值则呈现出先减后增的趋势。总的来说，2000~2020 年研究区内耕地、林地、草地的生态系统服务价值减少，变化率分别为-1.15%、-0.68%、-0.35%，水域的生态系统服务价值增加，变化率为 2.18%。

Table 3. Value structure and change of ecosystem services in Guangzhou
表 3. 广州市各土地利用类型生态系统服务价值结构及变化率表

景观类型	价值划分	生态系统服务价值(亿元)			生态服务价值变化率		
		2000 年	2010 年	2020 年	2000~2010 年	2010~2020 年	2000~2020 年
耕地	价值量	18.45	17.73	14.01	-0.12%	-1.04%	-1.15%
	比例	7.40%	7.29%	6.25%			
林地	价值量	123.64	123.17	109.65	1.03%	-1.71%	-0.68%
	比例	49.59%	50.63%	48.92%			
草地	价值量	3.08	3.23	1.98	0.09%	-0.44%	-0.35%
	比例	1.24%	1.33%	0.88%			
水域	价值量	104.13	99.17	98.52	-1.01%	3.19%	2.18%
	比例	41.77%	40.76%	43.95%			
建设用地	价值量	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%
	比例	0.00%	0.00%	0.00%			
未利用地	价值量	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%
	比例	0.00%	0.00%	0.00%			
合计	价值量	249.32	243.3	224.16	0.00%	0.00%	0.00%
	比例	100.00%	100.00%	100.00%			

通过计算评价单元格的单位面积生态系统服务价值，结合中心点赋值法，运用 GIS 软件进行克里金插值，并结合自然间断点法，将广州市的评价单元生态系统服务价值划分为低(0,883)、较低(883,1325)、

中[1325,1899)、较高[1899,2892)、高[2892,5630]这五个等级,形成三幅单位面积生态系统服务价值空间格局分布图(图 3)。

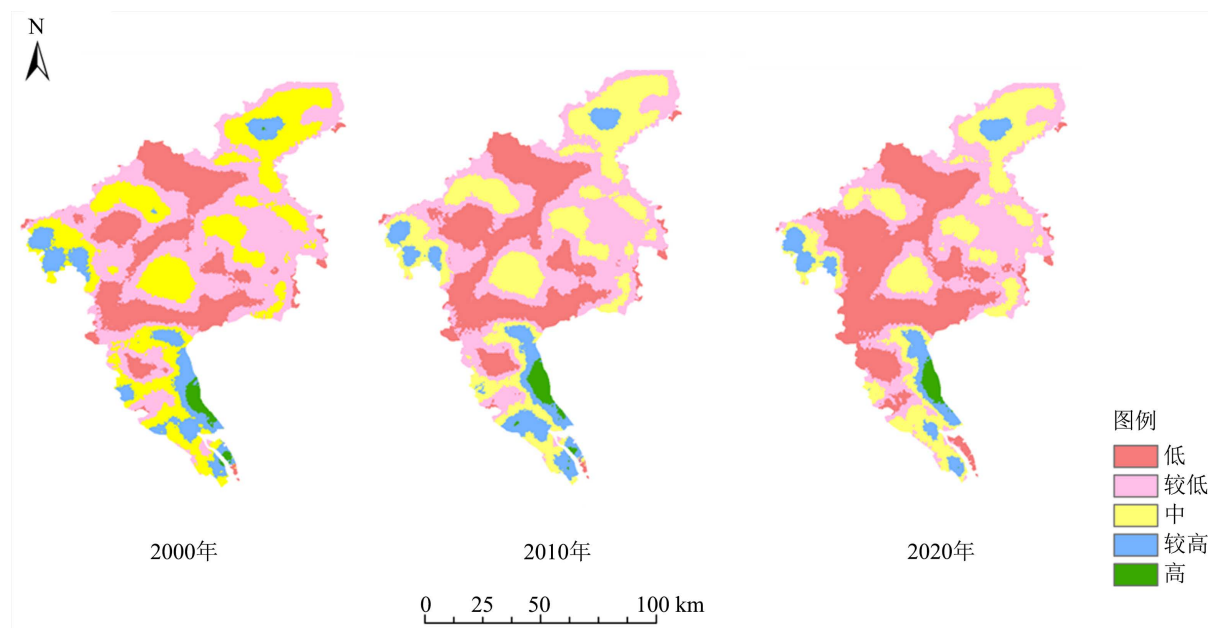


Figure 3. Distribution of spatial patterns of ecosystem service values per unit area

图 3. 单位面积生态系统服务价值空间格局分布图

广州市单位面积生态系统服务价值都以较低等级为主,并且 2000~2020 年低等级面积不断增加,由 20.85%增至 33.62%,而较低、中、较高等级面积在不断减少,高等级面积先增加后减少,二十年来面积由 1.14%增至 1.16%,面积变化不明显。花都区的西南部、从化区的东北部和南沙区的生态系统服务价值相对较高,主要为中和较高等级。而广州市中部分布大面积的低等级的生态系统服务价值,且面积还在逐年增加。总体上看,从 2000 年至 2020 年广州市单位面积生态系统服务价值在不断减少,且变化速率呈现增加的趋势。

3.2. 生态风险时空变化分析

通过 ArcGIS 软件,以所划分的 2027 个评价单元为基础,对所计算出来的评价单元生态风险指数进行克里金插值,观察结果,计算出的三期图像的生态风险指数均在 0.0454~0.3965 之间,将生态风险指数划分为五个等级:低(<0.1)、较低(0.1~0.15)、中(0.15~0.2)、较高(0.2~0.25)、高(>0.25)。生成三幅不同时期广州市生态风险指数空间分布图(图 4),并通过计算得到 2000~2020 年广州市生态风险等级结构表(表 4)和 2000~2020 年广州市生态风险等级变化趋势图(图 5)。

通过观察图 4,可以发现高生态风险指数的区域由西南部向东南部扩散,其他区域的生态风险指数也有不同程度的升高。由于城市化进程的加快,在城市建设用地面积不断增加的同时,林地、草地、耕地的面积在不断被侵蚀,导致生态系统的生态风险不断增加,生态系统稳定性被破坏。

根据表 4 和图 5 可知,二十年来广州市高生态风险指数区域在不断增加,由 2000 年的 4.85%增至 2020 年的 19.62%,中风险指数和较高风险指数的区域面积占比同样在增加,低风险指数和较低风险指数的区域面积占比在逐年减小,与 2000~2010 年相比,2010~2020 年的生态风险指数变化率更高,高生态风险指数区域面积占比变化尤为显著。反映出随着城市发展的加速,生态系统也以更快的速度在恶化。

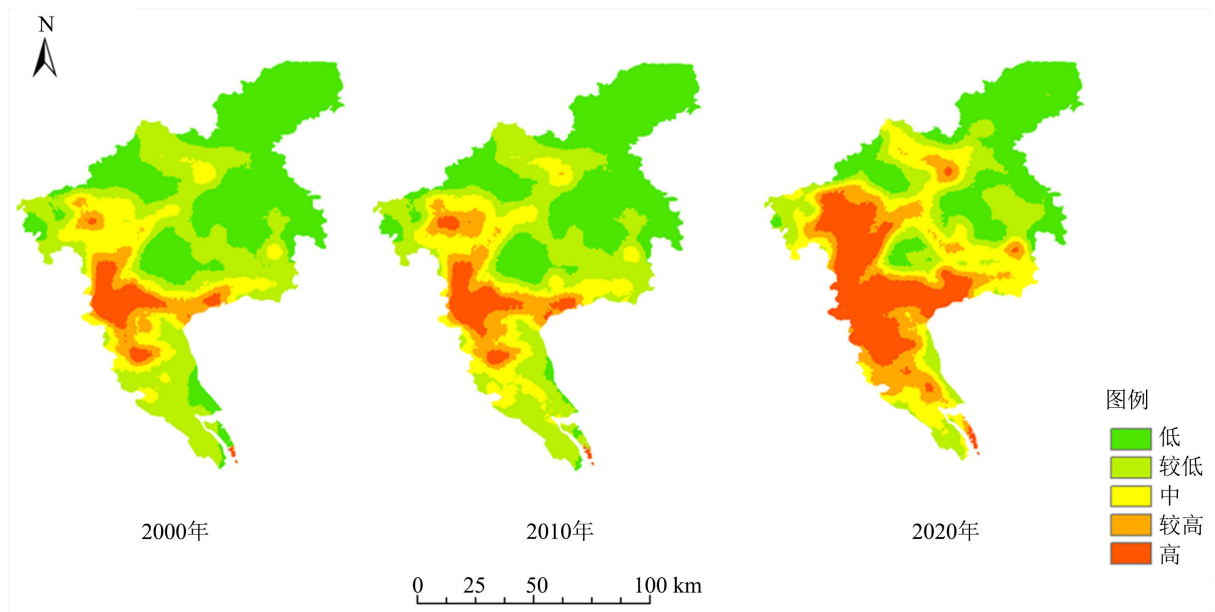


Figure 4. Spatial pattern change of ecological risk in Guangzhou
图 4. 广州市生态风险指数空间分布图

Table 4. Area proportion of ecological risks in Guangzhou from 2000 to 2020
表 4. 2000~2020 年广州市生态风险等级面积比例占比表

	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
2000	41.63%	31.91%	14.52%	7.09%	4.85%
2010	39.25%	30.06%	16.52%	8.56%	5.61%
2020	27.46%	19.26%	20.16%	13.50%	19.62%

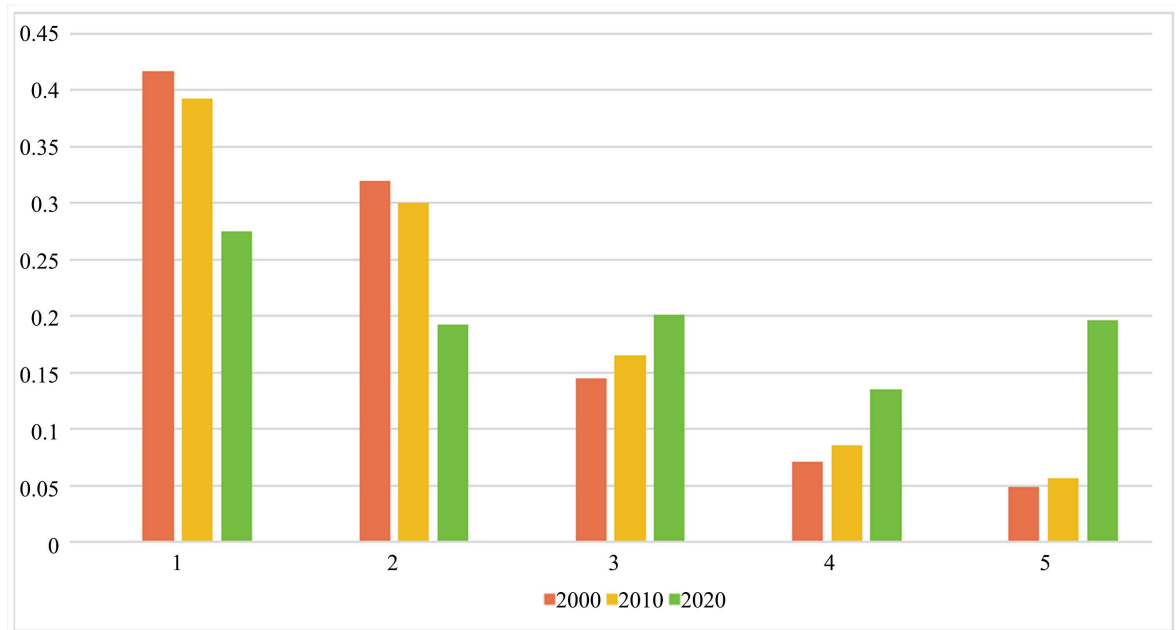


Figure 5. Change trend of ecological risk levels in Guangzhou from 2000 to 2020
图 5. 2000~2020 年广州市生态风险等级变化趋势图

3.3. 生态系统服务价值与生态风险相关性分析

通过 GeoDa, 采用双变量空间自相关模型对研究区内生态系统服务价值和生态风险指数的空间相关性进行分析。2000 年、2010 年、2020 年研究区的全局 Moran' I 分别为: -0.181 、 -0.198 、 -0.27 , Z 得分均小于 -2.58 , P 值均小于 0.01, 表明结果可信。

广州市生态系统服务价值和生态风险空间自相关的双变量 LISA 聚类图如图 6 所示。根据图 6 可知, 相关性显著的区域主要在白云区、黄浦区、番禺区、荔湾区、海珠区越秀区、天河区、从化区的东北区和增城区的东北部。显著模式可以分为以下五种: 不显著、高价值 - 高风险、高价值 - 低风险、低价值 - 低风险、低价值 - 高风险。高价值、高风险区域主要分布在广州市区, 这一部分以建设用地为主, 其所提供的生态系统服务价值主要以满足人类的需求为主, 处于较为稳定的状态; 低价值 - 低风险区域主要分布在研究区东北部的边缘, 属于城市的边缘地带, 对这一区域的开发少, 干扰程度也小, 生态系统服务价值低, 生态风险也低。低价值 - 高风险区域主要分布在研究区西南部, 属于广州市区, 建设用地分布广泛且逐渐扩张, 对这一区域的开发力度大且程度完全, 因此区域所能提供的生态系统服务价值低, 这里人类活动集中, 对生态系统的干扰很强, 因此生态风险高。高价值 - 低风险区域主要分布在研究区的东北部以及中部, 该类型分布区域主要是在人类干扰程度小、人类活动少的地方, 生态系统服务价值高而生态风险低。不显著区域表示该地区生态系统服务价值和生态风险的集聚关系不够显著, 占研究区的 41.75%~48.95%, 这一区域主要为耕地、水域和林地, 生态系统服务价值和生态风险指数的分布都相对比较均匀, 没有明显的极值中心。从 2000 年到 2020 年, 低价值 - 高风险区域逐步增加, 高价值 - 低风险区域逐步减少, 反映出研究区内生态环境不断恶化。

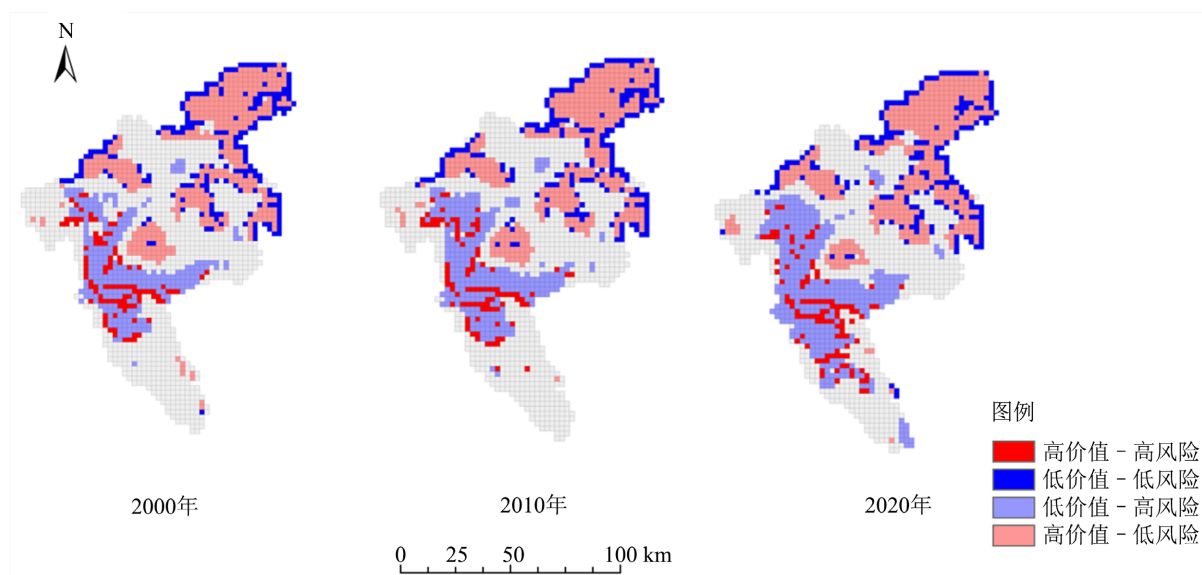


Figure 6. Bivariate LISA clustering of spatial autocorrelation of ecosystem service value and ecological risk in Guangzhou
图 6. 广州市生态系统服务价值和生态风险空间自相关的双变量 LISA 聚类图

4. 结论与讨论

4.1. 结论

2000 年~2020 年生态系统服务价值由 249.32 亿元降至 224.16 亿元, 减少了 10.09%。低等级生态系统服务价值区域的面积逐年增加, 较低、中、较高等级区域的面积在不断减少, 变化速率呈现上升的趋

势。广州市的生态质量恶化。

生态风险指数不断增加,高生态风险的面积 20 年来增加了 14.77%,且生态风险指数上升的速度越来越快,在城市建设用地面积不断增加的同时,林地、草地、耕地的面积在不断被侵蚀。

通过 LISA 聚类可以知道,高价值-低风险区域的面积在不断减小,低价值-高风险区域的面积在渐渐增加;高价值-低风险区域是生态安全区域,也是生态系统服务价值的主要提供者,这些区域面积的减少警示我们要注意生态系统的保护,以免影响人类的生存和生活。

4.2. 讨论

生态系统服务价值揭示了生态系统对人类生存的贡献,生态风险指数暗示了生态系统的脆弱性,这些都值得人们的关注。将这两者结合能够更好的反映出人类生产活动对生态系统的影响,为生态环境的保护提供参考资料。

参考文献

- [1] 方创琳, 张国友, 薛德升. 中国城市群高质量发展与科技协同创新共同体建设[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 2898-2908.
- [2] 张慧霞, 庄大昌, 姜全胜. 基于土地利用变化的东莞市海岸带生态风险研究[J]. 经济地理, 2010, 30(3): 489-493. <https://doi.org/10.15957/j.cnki.jjdl.2010.03.021>
- [3] Wang, J., Zhou, W., Pickett, S.T.A., Yu, W. and Li, W. (2019) A Multiscale Analysis of Urbanization Effects on Ecosystem Services Supply in an Urban Megaregion. *Science of the Total Environment*, **662**, 824-833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.260>
- [4] 陈令君. 城市生态建设与保护[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2015, 9(6): 19-22, 31. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-9272.2015.06.004>
- [5] 李婷. 京津冀城市群生态环境可持续发展的政策评价——基于 DPSIR-TOPSIS 模型[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 107-113.
- [6] 孙泽笑, 赵邦宏, 秦安臣, 朱克西. 生态脆弱区乡村旅游可持续发展测度及影响因素分析——以昆明市东川区为例[J]. 生态经济, 2022, 38(3): 157-163, 170.
- [7] 王成军, 汤翔翔, 冯涛, 杜传甲, 张炳林. 基于能值生态足迹的黄河流域 9 省区可持续发展评价[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 138-151.
- [8] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张镜铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [9] 杨方亮, 许红娜. “十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 73-82. <https://doi.org/10.19880/j.cnki.ccm.2021.05.012>
- [10] 姜仁良. 土地资源利用与生态环境保护交互耦合关系及规律研究[J]. 生态经济, 2013(9): 77-81+86.
- [11] 张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2353-2373.
- [12] 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 [J]. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [13] 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.
- [14] 李辉, 周启刚, 李斌, 国洪磊, 王福海, 何昌华. 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.
- [15] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [16] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [17] 胡应龙, 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 李娟娟, 杨智威. 广州市生态系统服务价值空间异质性变化[J]. 热带地理, 2018, 38(4): 475-486. <https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003059>
- [18] 周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1017-1028.

-
- [19] 叶长盛, 冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2013(19): 224-232.
- [20] 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[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3295-3302.
- [21] 靳甜甜, 张云霞, 朱月华, 巩杰, 燕玲玲. 黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性——以子午岭区为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1623-1632. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202105.030>
- [22] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377.