

# 滇中城市群生态韧性与人类活动强度 时空演变特征及其耦合关系

陆璐<sup>1,2</sup>, 赵俊三<sup>1,2</sup>, 林伊琳<sup>1,2</sup>, 陈国平<sup>1,2</sup>, 刘艳<sup>1,2</sup>

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2.自然资源智慧治理产学研融合创新基地, 昆明 650093)

**摘要:** [目的] 揭示滇中城市群生态韧性与人类活动强度的时空演变特征及耦合关系, 为实现区域人地系统协同发展提供科学依据。[方法] 以滇中城市群为例, 基于网格尺度, 分别构建生态韧性评价模型和人类活动强度评估模型, 在此基础上采用标准差椭圆与冷热点分析探究 1990—2020 年生态韧性和人类活动强度的时空演变特征, 运用四象限模型揭示二者耦合关系并提出分区管理策略。[结果] (1) 1990—2020 年滇中城市群生态韧性整体缓慢上升, 均值由 0.41 增至 0.45, 增长约 9.76%, 空间格局表现为“西高东低”, 高值区集中于研究区西部等生态功能区, 低值区则多位于城市扩张边缘区域; (2) 研究期间滇中城市群人类活动强度持续增强, 均值由 0.037 1 上升至 0.045 3, 开发范围由昆明主城区向玉溪、曲靖、楚雄等周边区域扩展, 形成由点状聚集向多中心、面状蔓延的空间格局; (3) 研究区生态韧性与人类活动强度的耦合关系呈现出“核心权衡—外围协同”的格局, 生态治理成效显著的次核心区为协调发展区, 而城市建成区与开发新区则表现为“高开发—弱生态”的权衡型区域。[结论] 滇中城市群生态韧性与人类活动强度在近 30 年间呈现出“整体协调提升、局部失衡加剧”的交互演化特征。基于耦合类型提出了分区管理策略, 强化协同区生态支撑能力, 提升权衡区生态恢复与风险防控水平。

**关键词:** 生态韧性; 人类活动强度; 四象限模型; 滇中城市群

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0333-11

## Spatiotemporal evolution characteristics and coupling relationship between ecological resilience and human activity intensity in Central Yunnan Urban Agglomeration

Lu Lu<sup>1,2</sup>, Zhao Junsan<sup>1,2</sup>, Lin Yilin<sup>1,2</sup>, Chen Guoping<sup>1,2</sup>, Liu Yan<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Natural Resources Intelligent Governance Industry-University-Research Integration Innovation Base, Kunming 650093, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal evolution characteristics and coupling relationship between ecological resilience and human activity intensity in the Central Yunnan Urban Agglomeration, thereby providing a scientific basis for the synergistic development of regional human-land systems. [Methods] Taking the Central Yunnan Urban Agglomeration as an example, an evaluation model for ecological resilience and an assessment model for human activity intensity at the grid scale were constructed. On this basis, standard deviation ellipse and hotspot and coldspot analysis were employed to analyze the spatiotemporal evolution characteristics of ecological resilience and human activity intensity from 1990 to 2020. The four-quadrant model was used to reveal their coupling relationship and to propose zoning management strategies. [Results] (1) From

收稿日期: 2025-07-26

修回日期: 2025-08-05

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42301304); 地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合资助项目(2024-04-14)

第一作者: 陆璐(2001—), 女, 广西钦州人, 硕士研究生, 主要从事生态韧性和国土空间规划研究。E-mail: 1273054369@qq.com

通信作者: 赵俊三(1964—), 男, 河南邓州人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事 GIS 和国土资源信息化研究。E-mail: 1429620189@qq.com

<https://stbcj.publish.founderss.cn>

1990 to 2020, the overall ecological resilience of the Central Yunnan Urban Agglomeration increased slowly, with the average value rising from 0.41 to 0.45, representing an increase of approximately 9.76%. The spatial pattern was characterized by “high in the west and low in the east”, with high-value areas concentrated in the western part of the study area and other ecological functional zones, while low-value areas were mainly located in the peripheral regions of urban expansion. (2) During the study period, human activity intensity in the Central Yunnan Urban Agglomeration continuously increased, with the average value rising from 0.037 1 to 0.045 3. The development scope expanded from the main urban area of Kunming to surrounding areas such as Yuxi, Qujing, and Chuxiong, forming a spatial pattern evolving from point-based clustering to multi-centered and areal expansion. (3) The coupling relationship between ecological resilience and human activity intensity in the study area exhibited a pattern of “core trade-off—peripheral synergy”. Sub-core areas with significant ecological management performance served as coordinated development zones, while urban built-up areas and newly developed areas showed a trade-off pattern characterized by “high development level-low ecological resilience”. [Conclusion] Over the past 30 years, ecological resilience and human activity intensity in the Central Yunnan Urban Agglomeration have exhibited an interactive evolution characterized by “overall coordinated improvement and intensified local imbalance”. Based on the coupling types, zoning management strategies are proposed to enhance the ecological support capacity of synergistic areas and improve the levels of ecological restoration and risk prevention in trade-off areas.

**Keywords:** ecological resilience; human activity intensity; four-quadrant model; Central Yunnan Urban Agglomeration

在全球气候变化和城市化快速推进的背景下,城市面临多重生态风险与发展压力<sup>[1]</sup>,城市生态系统的稳定性与可持续性成为当前城市治理与规划中的核心议题。生态韧性(Ecological Resilience, RES)作为城市系统响应和环境恢复能力的重要表征,在衡量其稳定性与可持续性方面发挥着关键作用。生态韧性不仅反映生态系统在扰动下维持和重构的能力,也是构建安全、绿色、人居友好型城市的基础<sup>[2]</sup>。同时,人类活动强度(Human Activity Intensity, HAI)作为衡量城市开发强度与资源环境受干扰程度的关键指标,是影响生态系统空间格局变化的外部驱动力之一<sup>[3]</sup>。过度的人类干预可能导致生态系统结构破碎、功能退化,进而降低生态韧性,反之,科学合理的活动则可增强系统的适应与恢复能力。

韧性作为描述系统面对扰动时适应和恢复能力的重要概念,已广泛应用于生态学和城市研究领域<sup>[4]</sup>。城市韧性包括生态、社会、经济、制度与基础设施等多个维度<sup>[5]</sup>,本文主要聚焦于生态韧性。现有生态韧性评价方法主要采用综合指数法,研究路径包括:(1)从网络视角出发,评估生态网络的韧性结构及其核心节点的影响广度与强度<sup>[6]</sup>;(2)基于韧性三要素“抵抗力—适应力—恢复力”构建指标体系<sup>[7]</sup>;(3)借鉴生态安全评价方法,如“压力—状态—响应”模型<sup>[8]</sup>和生态廊道识别等<sup>[9]</sup>。上述方法从不同视角揭示了生态系统在城市化背景下的动态响应机制。

人类活动强度指一定区域内人类生产、建设、休闲

等活动对地表生态环境造成扰动的综合程度<sup>[10]</sup>。量化HAI是评估人类活动对生态环境影响的关键环节,现有研究主要从两类视角构建评估模型:一类基于“压力”视角,采用加权综合指标体系<sup>[11]</sup>、人类或生态足迹指数<sup>[12]</sup>及人类活动压力指数等<sup>[13]</sup>方法,衡量人类对生态系统施加的直接压力;另一类则从“状态变化”出发,量化人类活动引发的生态要素变化,如土地利用格局演变<sup>[14]</sup>、生态系统服务变化<sup>[15]</sup>及景观格局变化<sup>[16]</sup>,常用方法包括景观破碎度指数<sup>[17]</sup>、人类活动强度指数<sup>[18]</sup>和MODIS全球干扰指数等<sup>[19]</sup>。这些方法从不同层面揭示了人类活动对生态系统的干扰特征与空间差异。

近年来,城市生态韧性与人类活动强度的研究逐渐增多,学者们多从城镇化<sup>[20]</sup>、土地利用强度<sup>[21]</sup>及社会经济等因素出发,探讨其对生态系统的影响,取得了丰富成果。但现有研究多侧重单一要素的驱动分析,缺乏对生态韧性与人类活动强度耦合关系的系统性探讨,尚未形成统一的理论框架和评价方法体系。而且当前研究多聚焦于京津冀、长三角等平缓发达地区,却忽视了地形破碎、生态脆弱的山地城市群所面临的独特困境。相比之下,滇中城市群作为我国典型的高原山地城市群,地形破碎、生态系统敏感、开发压力突出,其人地系统互动关系更为复杂,但相关研究仍显薄弱,亟需开展针对性和区域性的深入探讨。

滇中城市群作为我国西南地区具有代表性的高原城市群,其地形起伏大、生态结构复杂、城市空间扩展受限,加之其兼具生态屏障与区域发展的双重

功能定位,面临生态环境保护与城镇快速扩张并存的双重挑战。因此,本文以滇中城市群为研究对象,基于多源遥感数据,综合生态韧性与人类活动强度,构建耦合分析框架,系统探讨二者的时空演变特征、空间耦合关系及类型分布特征,为构建高原城市群生态安全格局与促进区域可持续发展提供科学依据与决策参考。

## 1 研究区与数据来源

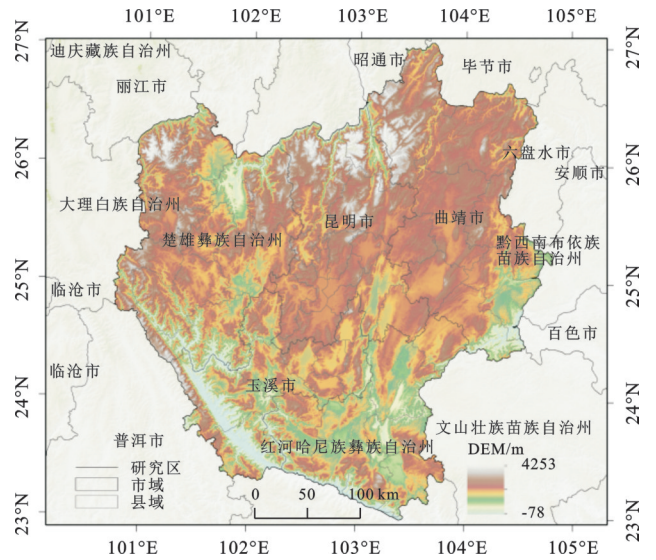
### 1.1 研究区概况

滇中城市群位于云南省中部,涵盖昆明、曲靖、玉溪、楚雄以及红河哈尼族彝族自治州北部的蒙自、个旧、开远、弥勒、建水、石屏、泸西等共49个县市,总面积约11.14万 $\text{km}^2$ (图1)。研究区域地处云贵高原西部,地形起伏较大,生态环境类型多样,涵盖湖泊、河流、山地和高原湿地等多种自然景观。滇中城市群是云南省人口、产业和资源要素最为密集的区域,承担着全省经济社会发展的核心功能。随着城镇化进程加快和交通基础设施的不断完善,区域内部联系日益紧密,城市建设用地迅速扩张,生态空间面临一定程度的压缩与破碎化。

### 1.2 数据来源与处理

本文主要使用的数据有土地利用数据和统计数据,以及量化人类活动强度所采用的指标数据:NDVI、GDP、人口密度、夜间灯光数据、道路数据和 $\text{CO}_2$ 排放量,数据来源详见表1。其中,土地利用数据依据《土地利用现状分类》(GB/T2010-2017)划分为

7类:耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地以及建设用。所有栅格数据的分辨率统一重采样至1 km,采用WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48 N投影坐标系。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 研究区域

Fig. 1 Study area

相较于传统的以行政单元为基础的分析方式,格网尺度方法通过统一空间分析单元,能够更好地揭示区域内部的空间异质性。因此,参考现有研究方法和研究区的实际情况以及计算效率选取 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的格网尺度作为基本分析单元<sup>[22]</sup>,共12 820个网格,计算城市生态韧性指数和人类活动强度指数并进行空间可视化。

表1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and descriptions

数据	来源	类型	分辨率
土地利用数据	武汉大学杨杰、黄昕两位教授发布的1990—2023年中国年度土地覆盖数据集( <a href="https://zenodo.org/records/5816591">https://zenodo.org/records/5816591</a> )	栅格	30 m
NDVI	全球变化科学研究数据出版系统( <a href="https://www.geodoi.ac.cn/">https://www.geodoi.ac.cn/</a> )	栅格	250 m
道路数据	中国历年地面交通网络数据库(1993—2020)( <a href="https://data.nber.org/data-appendix/w33515/">https://data.nber.org/data-appendix/w33515/</a> )	矢量	—
夜间灯光数据	国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )	栅格	1 km
GDP	其中1990—2010年的GDP数据来源于国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> ), 2020年的GDP数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格	1 km
人口密度	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	栅格	1 km
$\text{CO}_2$ 排放量	全球化石燃料二氧化碳排放数据(ODIAC)( <a href="https://www.odiag.org/">https://www.odiag.org/</a> )	栅格	1 km
社会经济统计数据	《云南省统计年鉴》以及各州市的《统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》	表格	—
DEM	地理空间数据云( <a href="https://gscloud.cn">https://gscloud.cn</a> )	栅格	30 m

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路

本文旨在揭示滇中城市群1990—2020年生态韧

性与人类活动强度的时空演变特征及耦合关系。首先构建生态韧性评估模型与人类活动强度评估模型,揭示其时空演变特征与分布格局,其次通过标准差椭圆和冷热点分析探究生态韧性和人类活动强度的时

空动态演变及空间集聚特征,最后基于四象限模型划分两者的耦合类型并提出分区优化策略与调控建议。

## 2.2 生态韧性评估模型构建

城市生态韧性可从抵抗力、适应力与恢复力3个方面评估,全面反映生态系统应对外部冲击的响应机制与动态演化能力。其中,抵抗力指系统在面对干扰时维持结构与功能稳定的能力,体现其抗压性与脆弱性。适应力体现的是生态系统在不确定环境下动态调整结构,以维持可持续运行的能力,其强弱决定了系统应对变化的灵活性与适应性。恢复力是指生态系统在受到外界干扰后,能够以一定速度恢复到原有或新的稳定状态的能力,体现了其自我修复与结构重建的综合水平。计算公式如下:

$$RES = \sqrt[3]{P \times A \times R} \quad (1)$$

式中:RES为生态韧性;P为抵抗力;A为适应力;R为恢复力。

本文将计算得出1990—2020年滇中城市群的生态韧性指数,运用自然断点分级法,将生态韧性分为5个等级,分别是低生态韧性( $RES < 0.2694$ )、较低生态韧性( $0.2694 \leq RES < 0.3681$ )、中生态韧性

( $0.3681 \leq RES < 0.4463$ )、较高生态韧性( $0.4463 \leq RES < 0.5897$ )、高生态韧性( $0.5897 \leq RES$ )。

2.2.1 抵抗力 研究表明,生态系统服务价值与抵抗力密切相关<sup>[23]</sup>,高服务价值有助于增强生态过程稳定性与功能持续性,反过来也强化系统结构的稳固性。因此,本文以生态系统服务价值作为抵抗力的衡量指标,基于谢高地等<sup>[24]</sup>修正的单位生态系统服务价值当量因子法,结合滇中城市群实际经济情况,选取水稻、小麦、玉米和大豆4类粮食作物,利用1990—2020年研究区的平均粮食单产和全国平均收购价进行计算。根据滇中城市群30 a平均粮食单产( $4783.39 \text{ kg/hm}^2$ )与全国同期均值( $4780.29 \text{ kg/hm}^2$ )的比值,确定修正系数,并结合粮食平均收购价(2.12元/kg),测算得到区域标准单位生态系统服务价值当量因子为1451.28元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。建设用地价值系数参考李志英等<sup>[25]</sup>研究,最终获得滇中城市群单位面积生态系统服务价值系数(表2),计算公式如下:

$$P = ESV = A_i \times VC_i \quad (2)$$

式中:ESV为生态系统服务价值; $A_i$ 为土地利用类型*i*的面积; $VC_i$ 为土地利用类型*i*的生态系统服务价值系数。

表2 滇中城市群单位面积生态系统服务价值系数

Table 2 Ecosystem service value coefficients per unit area in Central Yunnan Urban Agglomeration 元/ $\text{hm}^2$

生态系统类型	耕地	林地	灌木	草地	水域	裸地	建设用地
供给服务	食物生产	1604.70	450.19	275.92	551.84	1161.77	0
	原料生产	355.79	1031.08	624.45	813.24	334.01	0
	水资源供给	-1895.15	537.32	319.49	450.19	12038.89	0
调节服务	气体调节	1292.47	3412.71	2047.63	2860.87	1118.21	29.04
	气候调节	675.28	10209.10	6142.88	7566.06	3325.58	0
	净化环境	196.05	2889.91	1858.84	2497.82	8059.81	145.22
	水文调节	2171.07	5097.29	4864.93	5547.47	148474.82	43.57
支持服务	土壤保持	755.15	4153.35	2497.82	3485.32	1350.56	29.04
	维持养分循环	225.09	319.49	188.79	261.40	101.66	0
	生物多样性	246.88	3775.77	2279.98	3165.84	3703.16	29.04
文化服务	美学景观	108.92	1655.53	1002.03	1394.13	2744.69	14.52

2.2.2 适应力 系统越稳定,扰动后的恢复速度越快,适应能力越强。为此,本文以景观结构稳定性作为适应力的表征,从异质性与连通性两个维度展开。参考夏楚瑜等<sup>[7]</sup>的研究,采用香农多样性指数(SHDI)和面积加权平均斑块分维数(FRAC\_AM)衡量景观异质性,斑块凝聚度指数(COHESION)衡量景观连通性,计算公式如下:

$$A = 0.25SHDI + 0.25FRAC\_AM + 0.5COHESION \quad (3)$$

2.2.3 恢复力 高恢复力意味着系统具有较强“弹性”,可在灾后迅速恢复功能并重建结构,对保障城市的安全至关重要。本文基于Peng等<sup>[26]</sup>提出的生态

弹性模型,结合滇中城市群实际情况对模型系数进行修正(表3),计算公式如下:

$$R = \sum A_k \times RC_k \quad (4)$$

式中: $A_k$ 为土地利用类型*k*的面积比例; $RC_k$ 为土地利用类型*k*的恢复力系数。

表3 土地利用类型恢复力系数

Table 3 Resilience coefficients of land use types

土地利用类型	林地	耕地	灌木	草地	水域	裸地	建设用地
相对系数	0.9	0.3	0.7	0.6	0.8	1.0	0.2

## 2.3 人类活动强度评估模型构建

人类生产建设活动会对区域生态环境产生不同

类型的影响,其程度可通过人类活动强度指数量化。本文选取建设用地当量、人口密度、GDP密度、夜间灯光强度、道路密度和NDVI等指标(表4),表征人类活动对城市生态系统的空间扰动与环境压力。其中,道路密度反映土地开发水平与人类活动集聚性,密度越高干扰越强;CO<sub>2</sub>排放量揭示能源利用密度与生态压力;NDVI为负向指标,数值越低表明生态退化越严重。建设用地当量系数参照徐勇等<sup>[27]</sup>研究设定。

人类活动强度评估模型如下:

$$HAI = \sum_{j=1}^7 X_j \times A_j \quad (5)$$

式中:HAI为人类活动强度; $X_j$ 为经过标准化后的指标值; $A_j$ 为指标 $j$ 的权重,各指标经过极值法标准化后采用熵值法确定权重。

然后,根据计算得出滇中城市群每个格网的人类活动强度,并按照自然断点分级法,将人类活动强度分为五级:低强度( $HAI < 0.0332$ )、较低强度( $0.0332 \leq HAI < 0.0562$ )、中强度( $0.0562 \leq HAI < 0.1027$ )、较高强度( $0.1027 \leq HAI < 0.2122$ )、高强度( $0.2122 \leq HAI$ )。

表4 指标权重  
Table 4 Indicator weights

指标	单位	属性	权重
建设用地当量	%	正	0.0393
人口密度	人/km <sup>2</sup>	正	0.1677
GDP密度	万元/km <sup>2</sup>	正	0.3028
夜间灯光强度	—	正	0.1435
道路密度	km/km <sup>2</sup>	正	0.1379
CO <sub>2</sub> 排放量	t/km <sup>2</sup>	正	0.1247
NDVI	—	负	0.0841

### 2.4 RES与HAI时空演变特征

2.4.1 标准差椭圆及重心模型 标准差椭圆与重心模型法是常用的空间分析工具,能够有效揭示地理要素的空间分布格局及其演变方向。本文采用这两个方法分析滇中城市群生态韧性与人类活动强度的空间格局及其变化,计算方法详见赵璐等<sup>[28]</sup>文献。

2.4.2 冷热点分析 冷热点分析通常用于探索地理对象的空间聚合关系,本文使用Getis-Ord  $G_i^*$ 统计工具来阐明RES和HAI的空间聚集模式,具体计算公式见文献<sup>[29]</sup>。

### 2.5 RES与HAI时空耦合关系

四象限模型最初是用于分析房地产市场变化的一种工具,后逐渐应用于生态环境方面,常用于探讨两个变量之间的耦合关系、协调状态或空间交互关

系。本文采用四象限模型分析滇中城市群生态韧性与人类活动强度的空间耦合关系,模型以生态韧性为纵轴,人类活动强度为横轴,基于自然间断法划分为4个象限(图2),该方法能够基于数据自身分布特征,最大化类内相似性与类间差异性,避免主观设定阈值所带来的偏差。其中,象限I为高生态韧性—高人类活动强度耦合,象限II为高生态韧性—低人类活动强度耦合,象限III为低生态韧性—低人类活动强度耦合,象限IV为低生态韧性—高人类活动强度耦合。

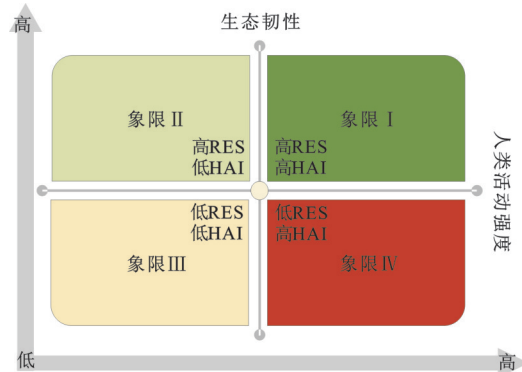


图2 生态韧性与人类活动强度的四象限模型

Fig. 2 Four-quadrant model of ecological resilience and human activity intensity

## 3 结果与分析

### 3.1 生态韧性时空变化特征

1990—2020年滇中城市群生态韧性均值由0.41上升至0.45,增幅为9.76%,呈缓慢提升趋势,说明区域生态系统的抵抗力、恢复力与适应力在城市化进程中有所增强,系统对外部干扰的响应与调节能力逐步提升。从生态韧性的等级面积来看(图3),生态韧性等级以较高水平为主,面积占比持续上升,由不足50%增至60%以上,反映生态系统稳定性和自适应能力增强。同期,低、较低及中等韧性区域面积占比均有所下降,尤以较低韧性区域降幅最显著。尽管整体韧性有所提升,但高生态韧性区域所占比例较小,表明局部生态系统中仍存在脆弱单元。

从滇中城市群生态韧性的空间分布及变化来看(图4),生态韧性等级呈现出“西高东低”的分布格局。较高生态韧性区域主要集中于西部山地区,如哀牢山、无量山等地。这些区域地形起伏大、植被良好,生态系统结构稳定,且受到生态红线的严格管控,受到人类干扰较小。相较之下,地势平坦、开发强度高的东部坝区则以低生态韧性为主,尤其是昆明、曲靖、红河北部等城市核心区,城市化扩张对生态系统造成持续压力,因此生态韧性水平普遍较低。2000年后,得益于退耕还林、水源地保护、矿区整治

等生态工程的推进,部分城市边缘及丘陵区如楚雄、曲靖的低韧性区有所收缩,生态韧性等级逐步提升。至2020年,研究区生态韧性形成以高原湖泊流域如滇池、抚仙湖等为核心的高韧性区。但城市核心区生态压力依然突出,亟需优化空间布局和资源管理。

### 3.2 人类活动强度时空变化特征

1990—2020年滇中城市群人类活动强度均值由0.037 1升至0.045 3,整体呈持续上升趋势,反映城市化与人类干扰程度不断增强。研究期间,滇中城市群的人类活动强度等级以低强度和较低强度为主(图5),占比均在30%以上,且低强度面积占比由2000年超50%降至2020年约45%。中强度及以上等级的面积占比逐步上升,尤以中强度增长最为显著,从不足10%增至约15%。高强度区域虽占比不

高,但呈持续扩展态势。

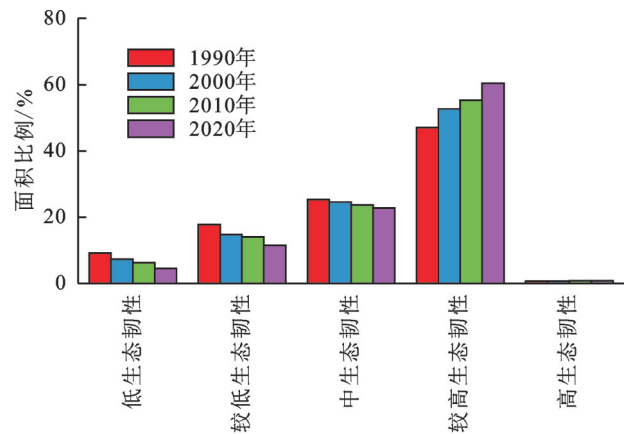


图3 滇中城市群生态韧性等级面积比例

Fig. 3 Area proportion of ecological resilience levels in Central Yunnan Urban Agglomeration

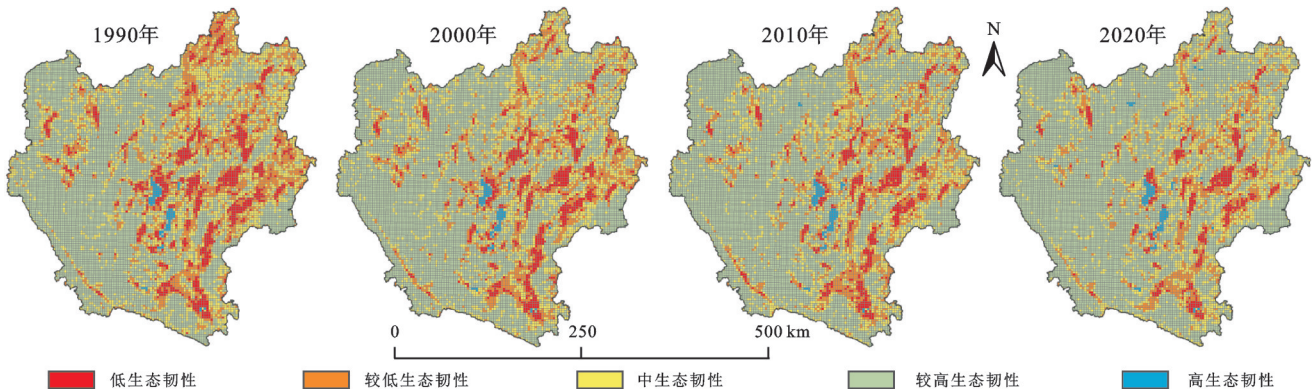


图4 滇中城市群生态韧性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological resilience in Central Yunnan Urban Agglomeration

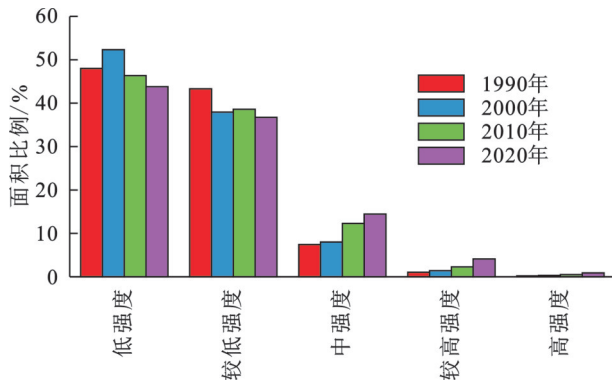


图5 滇中城市群人类活动强度面积比例

Fig. 5 Area proportion of human activity intensity in Central Yunnan Urban Agglomeration

从滇中城市群人类活动强度的空间分布及变化来看(图6),呈现出空间上“核心增强,多点扩散”的格局演化特征。1990—2000年人类活动主要集中于昆明主城区,特别是五华、官渡、西山等地区,表现出明显的中心聚集特征。2010年后,区域人类活动强度显著增强,并从昆明逐步向周边城市扩展。曲靖中部、玉溪红塔区、楚雄东部及红河北部等地形成多个中高强度连续片区,表明次级城市功能在不断提

升,人类活动格局由“点状集中”向“面状集聚”转变。这一变化与滇中区域发展政策密切相关,2011年《滇中城市群发展规划》中明确以昆明为核心构建现代化城市群,推动城市功能外溢和基础设施延伸,加快了城镇化进程和土地开发强度。此外,生态保护红线的划定在一定程度上抑制了高价值生态区域的开发,有效引导人类活动向可承载区域集聚,形成以昆明为核心、向四周多点扩展的空间格局。

### 3.3 RES与HAI时空演化特征

3.3.1 标准差椭圆及重心转移 由标准差椭圆与重心迁移图(图7)可以看出,1990—2020年滇中城市群生态韧性与人类活动强度呈现出显著的空间演变特征。生态韧性的标准差椭圆面积由1990年的61 940.74 km<sup>2</sup>增至2020年的62 285.45 km<sup>2</sup>,具有轻微扩张趋势,说明生态高韧性区整体呈缓慢外展态势。标准差椭圆呈近似圆形,长期保持稳定,仅在空间上略向东北—西南方向拉伸,表明生态韧性分布格局与生态政策调控密切相关,符合云南“两屏三带”生态安全格局和《生态保护红线划定方案》中对生态功能区严控开发的要求。在重心迁移方面,

RES 重心整体呈小幅北移趋势,表明高生态韧性区域整体向北扩展。这一变化与研究区北部生态工程的持续推进密切相关,尤其是 2011 年建立了轿子山

国家自然保护区,推动北部区域生态系统结构的稳定性与服务功能的提升,增强生态系统的恢复力与适应性。

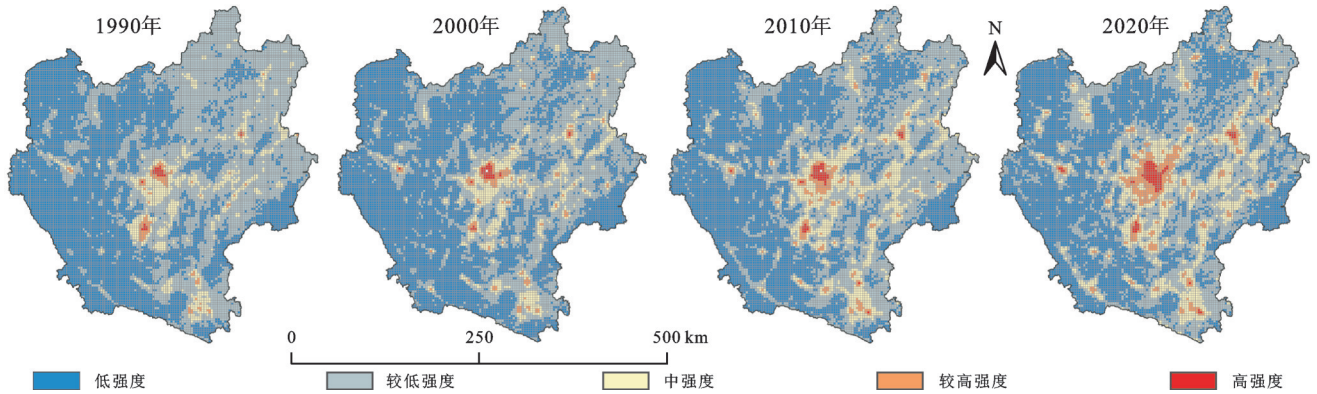


图 6 滇中城市群人类活动强度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of human activity intensity in Central Yunnan Urban Agglomeration

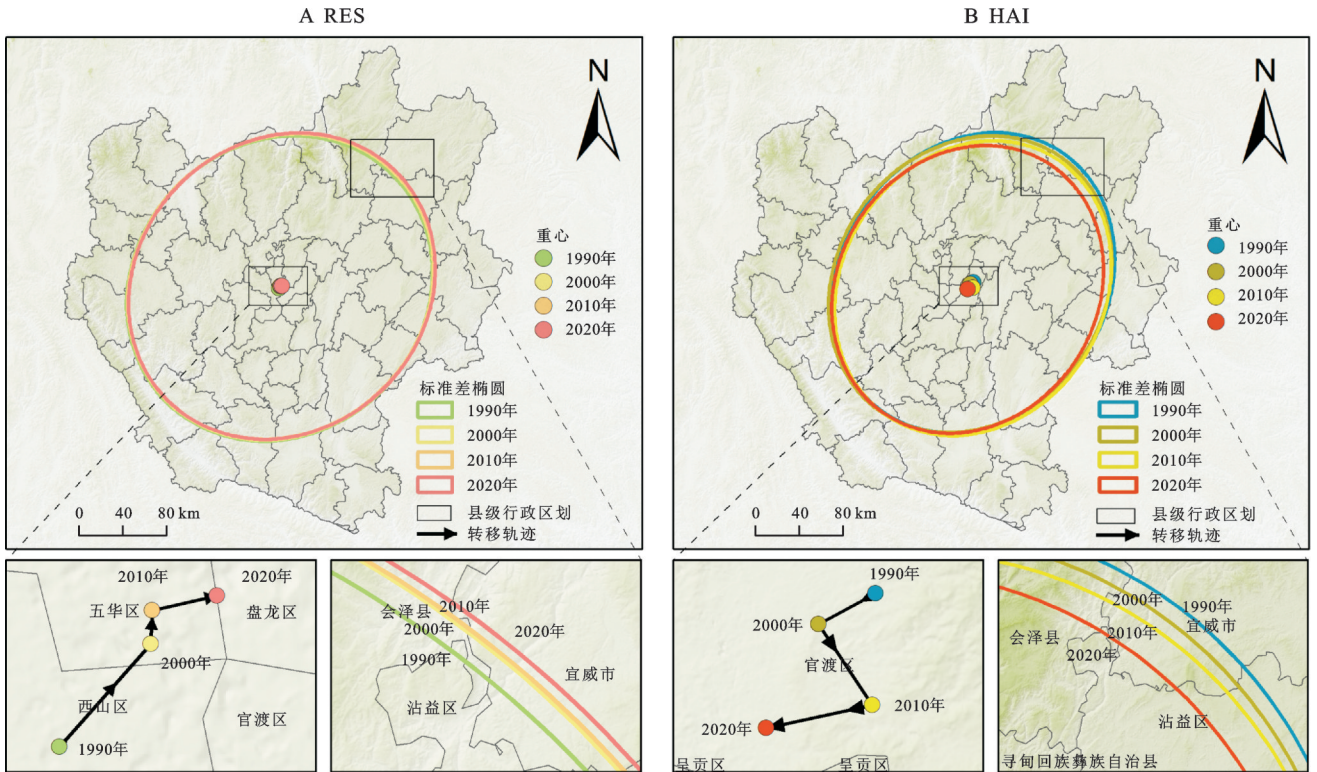


图 7 1990—2020 年生态韧性和人类活动强度标准差椭圆与重心迁移轨迹

Fig. 7 Standard deviation ellipse and center of gravity migration trajectories of ecological resilience and human activity intensity (1990—2020)

1990—2020 年滇中城市群人类活动强度在空间分布上呈现出“重心南移、格局趋紧”的演化特征。其标准差椭圆面积由 1990 年的 56 440.71 km<sup>2</sup> 缩减至 2020 年的 52 069.84 km<sup>2</sup>, 表明人类活动在空间上的扩展范围有所收敛, 活动分布更趋集聚。2000 年后, 随着昆玉—滇中—一体化、滇南开放门户建设等政策实施, 西南部城市逐步承接昆明产业溢出, 带动高强度开发区快速增长。特别是 2015 年滇中新区正式获批成为国家级新区后, 大量基础设施与产业项目集中布局, 成为区域开发热点, 推动标准差椭圆明显向

西南方向拉伸。从重心迁移轨迹看, 四期重心始终稳定分布在昆明市官渡区内部, 空间位置变化相对集中, 仅出现小幅南移, 说明高强度活动仍集中于核心城区。整体演化特征表明, 区域政策导向对人类活动空间格局的影响具有高度相关性, 应在未来生态管理中加强空间统筹与环境承载评估。

3.3.2 冷热点分析 从生态韧性集聚特征来看(图 8A), 1990—2020 年滇中城市群生态韧性热点区域主要稳定分布于自然保护区、高山林地和生态屏障带, 如哀牢山、轿子山、元江流域等地区, 这些区域生态

系统结构完整、干扰较少,具备较高的稳定性与自我调节能力。冷点区则集中于昆明主城区及周边高强度开发地带,这些区域受城镇扩展、工业开发和农业高强度利用等人类活动影响较大,生态系统结构破碎、恢复能力弱,导致生态韧性水平长期偏低,反映出其生态系统脆弱、抗干扰能力较差的现状。除此之外,部分原冷点区在近十年逐步转化为不显著区,显示出区域生态系统受益于生态修复与绿化政策,韧性水平得到一定程度提升,空间格局趋向稳定。

人类活动强度的空间格局则呈现出典型的集聚与外扩特征(图 8B)。HAI 在研究期内呈持续增强趋势,热点区从 1990 年起高度集中于昆明、曲靖、玉溪等中心城市的建成区,并随城市扩张不断向周边

乡镇外延,形成典型的“多核连片”发展格局。热度显著增强,范围持续扩大,反映出城市化和基础设施建设对土地开发利用的高密度需求。这一变化趋势与《滇中城市群国土空间规划(2020—2035 年)》中明确提出的“以昆明为中心,构建‘一主四副、通道对接、点轴联动’空间发展格局”高度契合。相反,冷点区域则逐年收缩,由 1990 年广泛分布于城市边缘及生态功能区,至 2020 年大部分演化为不显著区,仅在哀牢山—无量山生态红线区存在零星冷点,反映出人类活动强度有所上升。这些地区虽未形成热点,但生态保护区正面临开发扩张压力,亟需加强前瞻性管控,防止冷点“边缘热化”趋势演变为生态脆弱区。

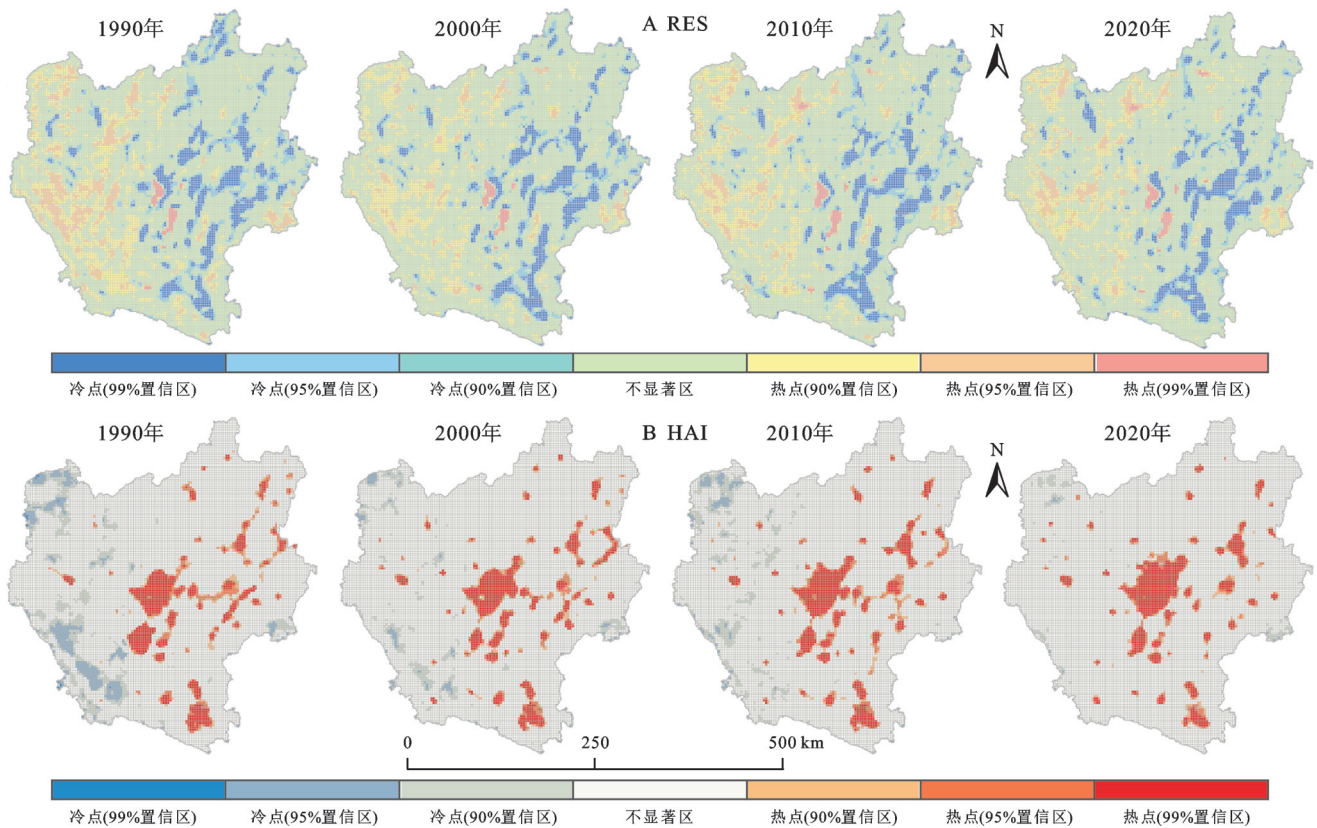


图 8 1990—2020 年滇中城市群生态韧性与人类活动强度冷热点分析

Fig. 8 Hotspot and coldspot analysis of ecological resilience and human activity intensity in Central Yunnan Urban Agglomeration (1990—2020)

3.3.3 RES 与 HAI 时空耦合关系 基于四象限模型分析,滇中城市群生态韧性与人类活动强度的耦合关系呈现出“核心权衡—外围协同”的空间格局,且演化趋势表现出“整体协调提升、局部失衡加剧”的特征。从象限类型分布来看(图 9),滇中城市群整体以象限 II (高生态韧性—低人类活动强度)为主,主要分布在研究区西部,如哀牢山、无量山生物多样性保护区和元江国家自然保护区等重点生态功能区,具备良好的生态本底,且受生态红线严格管控,保持了高韧性、低开发的格局。

研究区东部的曲靖、红河以及玉溪的新平、元江等地作为粮食主产区,地势平缓、耕地占比高,虽开发程度有限,但由于生态基础薄弱,整体呈现出“低开发—低韧性”的特征。以昆明主城区为代表的“高生态韧性—高人类活动强度”协同区,近年来通过生态投入和产业结构优化实现了人地系统的协调。一方面,城市绿地系统不断完善,截至 2020 年,昆明市森林覆盖率大于 52.0%,城市建成区绿地率大于 40%。另一方面,昆明大力推进产业结构转型,第三产业的 GDP 占比由 2010 年的 49.0% 上升至 2020 年

的 64.1%, 高技术服务业和生态旅游等绿色产业逐渐成为经济增长的重要支撑。相较之下, 安宁、曲靖麒麟区、红河州的开远与蒙自等地则表现出“高开发—低韧性”的权衡状态。这些区域近年来人口与产业快速集

聚, 建设用地扩张显著。以曲靖麒麟区为例, 2010—2020 年建设用地面积增加超过 40%, 但城市绿地率仅为 15%, 且第二产业在 GDP 中所占比重约为 48%, 工业化程度较高, 生态投入相对滞后。

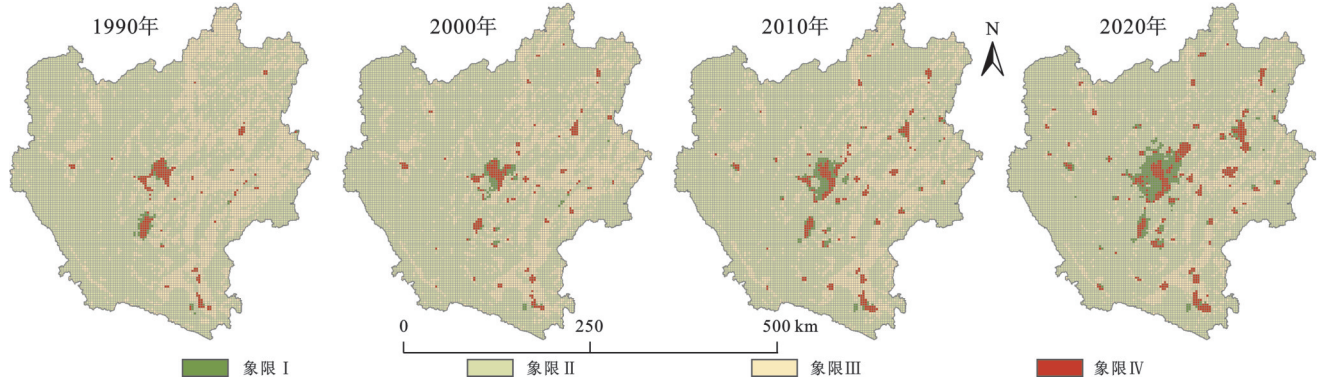


图 9 1990—2020 年滇中城市群四象限类型分布

Fig. 9 Distribution of four-quadrant types in Central Yunnan Urban Agglomeration (1990—2020)

从象限类型的时序转移来看(图 10), II → I 和 III → II 的转化最为显著, 反映了生态韧性持续增强的过程, 体现出生态建设与城市化在部分区域实现了较为协调的发展。这一变化主要得益于城市绿地系统建设、生态修复工程的持续推进及绿色基础设施布局优化, 如昆明主城区、呈贡新区通过生态廊道建设和湿地恢复显著提升了生态系统服务功能, 曲靖北部和

楚雄东部也在生态红线保护与基础设施改善等政策推动下呈现出类似协同发展趋势。2000 年后, 嵩明、陆良及红河北部等地区出现 III → IV 的转移, 这些原为低开发—低韧性的农业或生态用地, 因高速公路建设、产业园区布局和城镇扩张推动, 人类活动显著增强, 而生态基础薄弱、修复滞后, 逐步演化为“高开发—弱生态”的权衡型区域, 生态系统承压上升。

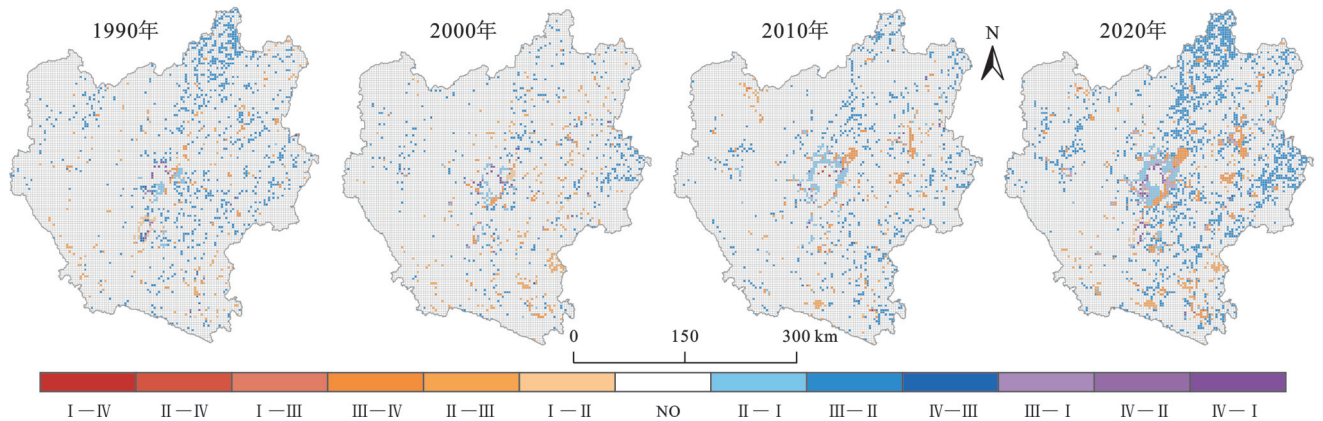


图 10 1990—2020 年滇中城市群四象限类型转换

Fig. 10 Transformation of four-quadrant types in Central Yunnan Agglomeration (1990—2020)

## 4 讨论

### 4.1 分区策略

基于滇中城市群生态韧性与人类活动强度的交互演化特征, 可针对不同耦合类型区域提出分区管理对策, 以推动区域生态安全格局优化与高质量协同发展。首先, 应持续扩大“高生态韧性—高人类活动强度”(象限 I) 区域的空间范围, 促进城市绿色发展转型。对于以昆明主城区、呈贡新区、玉溪中心城区为代表的高强度开发核心区, 建议持续推进生态功能嵌入式的城市更新模式。在高密度建成区内

部, 可通过构建多层次绿地系统如街头绿地、公园绿地、滨水生态带等、提升海绵城市水平等手段强化生态韧性, 缓解由人口密度与基础设施高负荷带来的生态压力。同时应加强土地节约集约利用, 控制低效扩张, 优化人类活动强度结构。

其次, 应重点保护和维持“高生态韧性—低人类活动强度”(象限 II) 区域的生态稳定性。对于以抚仙湖—阳宗海、滇池一级保护区、轿子雪山、九乡等地为代表的生态核心保护区与重要生态功能区, 应坚持生态优先原则, 严格落实生态保护红线与自然保护地管理制度。通过退耕还林还草、水源涵养、生态廊道连

通性提升等工程,增强系统自组织与恢复能力。对该类区域周边开发边界实行刚性控制,避免人为活动侵占生态敏感区,防止由“象限Ⅱ”退化为“象限Ⅳ”。

除此之外,对于“低生态韧性—低人类活动强度”(象限Ⅲ)区域,主要分布于滇中城市群的东部边缘地带,如曲靖市东部、红河州北部、东川—会泽一带以及高海拔山地与喀斯特丘陵交错地区。在空间管控上,应强化“三区三线”协同治理,严格限制开发边界外无序建设。不同城市群子区应因地制宜制定策略,如曲靖中部与北部丘陵坝区农业基础良好,可因地制宜发展生态农业、坡改梯和循环种植体系,对坡度在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的耕地实施梯田化整治,合理分段、分层修筑田埂、在低山丘陵地区推行林下经济模式等;而红河北部喀斯特石漠化严重区则应重点推进封山育林、立体种植、水土保持等生态修复工程,结合岩溶地貌特征选育耐旱、固土植物,遏制生态退化趋势。

最后,还应加强对“低生态韧性—高人类活动强度”(象限Ⅳ)区域的生态风险识别与开发强度调控。对于楚雄南部、曲靖中部、红河北部等城镇扩展与产业转型交汇区,应强化生态与开发的协同规划。建议在新型城镇化、交通枢纽建设与产业发展过程中预留生态空间,提升基础设施绿色化水平,并加强生态风险评估与事前管控。推动绿色产业导入与污染型产业外移,逐步从“低生态韧性—高人类活动强度”向“高一高协调型”转变。

#### 4.2 研究局限

本文虽较为系统地分析了滇中城市群生态韧性与人类活动强度的时空演变及其耦合关系,但仍存在以下不足:一是因子选取和驱动机制偏重自然与用地要素,社会经济、政策制度等人为驱动因子的量化与识别尚不充分;二是数据精度及来源差异可能带来不确定性,如NDVI、土地利用、夜间灯光等数据的精度可能会对结果造成误差,未来可进行数据对比检验来提升结果的可靠性;三是当前分析基于历史演变过程,未引入多情景模拟工具预测不同政策路径下生态系统响应,难以支撑空间规划中的前瞻性管理;四是生态韧性与人类活动间潜在的非线性关系尚未深入探讨,可能存在如“人类活动强度超过某一阈值后生态韧性骤降”等复杂响应机制,建议未来结合面板回归或阈值模型以及机器学习模型识别临界点与作用机制,提升耦合机制的解释力。

## 5 结论

(1) 1990—2020年滇中城市群生态韧性整体呈缓慢上升趋势,均值由0.41增长至0.45,增长约9.76%。

空间上呈“西高东低”格局。高值区集中于哀牢山、无量山及元江流域等生态功能区,低值区则集中于昆明、曲靖等中心城市外围及城镇扩张区域。值得注意的是,受高强度城市开发与土地利用变化影响,这些低值区生态系统脆弱性呈加剧趋势,表明区域生态韧性提升进程存在显著的空间异质性。

(2) 1990—2020年滇中城市群人类活动强度持续增强,均值由0.037 1上升至0.045 3,空间上由昆明主城区向曲靖、玉溪、楚雄等地辐射扩展,逐步由“点状聚集”向“面状蔓延”演变。受城乡建设、交通和产业布局驱动,人类活动干预范围不断扩大,区域开发由核心集聚向多中心分布演变,土地利用结构加速调整,城市群开发格局日益均衡。

(3) 滇中城市群生态韧性与人类活动强度呈现出“整体协调提升、局部失衡加剧”的交互演化趋势。空间耦合关系表现为以昆明、玉溪等城市核心的“权衡”区不断拓展,城市开发强度高而生态韧性相对滞后,生态系统承压加剧;而其外围的次核心区和生态治理重点区域,生态治理与城市建设实现良性互动,呈现“协同增强”态势。针对不同耦合类型区域,实施分区分类管控策略,一方面强化高韧性区的生态屏障功能,另一方面需预防潜在高风险区向生态退化演化。

#### 参考文献(References):

- [1] 邱国玉,张晓楠. 21世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 640-649.  
Qiu G Y, Zhang X N. China's urbanization and its ecological environment challenges in the 21<sup>st</sup> century [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6): 640-649.
- [2] Yang J, Wang S Y, Zhou J, et al. Optimisation of ecological security patterns in ecologically transition areas under the perspective of ecological resilience: a case of Taohe River[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112315.
- [3] 刘世梁,刘芦萌,武雪,等. 区域生态效应研究中人类活动强度定量评价[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.  
Liu S L, Liu L M, Wu X, et al. Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [5] 赵瑞东,方创琳,刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.  
Zhao R D, Fang C L, Liu H M. Progress and prospect of urban resilience research[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [6] Wang T, Li H B, Huang Y. The complex ecological net-

- work's resilience of the Wuhan metropolitan area [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130:108101.
- [7] 夏楚瑜,董照樱子,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究:以杭州市为例[J].*生态学报*,2022,42(1):116-126.  
Xia C Y, Dong Z, Chen B. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: a case study of Hangzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (1) : 116-126.
- [8] 孙宇,刘维忠,盛洋.基于PSR模型的新疆水资源经济生态韧性时空差异及影响因素分析[J].*干旱区地理*, 2023,46(12):2017-2028.  
Sun Y, Liu W Z, Sheng Y. Spatiotemporal differences and influencing factors of economic and ecological resilience of water resources in Xinjiang based on the PSR model[J]. *Arid Land Geography*, 2023,46(12):2017-2028.
- [9] 刘园园,马彩虹,马丽娅.黄河流域典型绿洲城市扩张模拟及其生态韧性响应研究[J].*干旱区地理*, 2025, 48 (3):506-516.  
Liu Y Y, Ma C H, Ma L Y. Simulation of urban expansion and its response to ecological resilience of typical oases in the Yellow River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(3):506-516.
- [10] 李海萍,王娜萍,代宇庭.云贵高原湿地景区人类活动强度的空间分布:以云南省拉市海流域为例[J].*应用生态学报*,2021,32(8):2915-2922.  
Li H P, Wang N P, Dai Y T. Spatial distribution of human activity intensity in Yunnan-Guizhou Plateau Wetland scenic area: a case study of Lashihai watershed in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8):2915-2922.
- [11] 陈泓瑾,刘琳,张正勇,等.天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性[J].*地理学报*,2022,77(5):1244-1259.  
Chen H J, Liu L, Zhang Z Y, et al. Spatiotemporal correlation between human activity intensity and surface temperature on the north slope of Tianshan Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5):1244-1259.
- [12] Xiong S W, Yang F. Multiscale exploration of spatio-temporal dynamics in China's largest urban agglomeration: an interactive coupling perspective on human activity intensity and ecosystem health [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 376:124375.
- [13] 王永财,胡卓玮,万华伟,等.陆域生态系统人类活动压力指数构建及不确定性分析[J].*生态学报*,2025, 45 (1):406-419.  
Wang Y C, Hu Z W, Wan H W, et al. Construction and uncertainty analysis of human activity pressure index in terrestrial ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(1):406-419.
- [14] 王璐晨,韩海辉,张俊,等.塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J].*中国地质*,2024, 51(1):203-220.  
Wang L C, Han H H, Zhang J, et al. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 2024, 51(1):203-220.
- [15] 黄莹,李阳兵,李婷,等.三峡库区生态系统服务价值与人类活动强度耦合关系的多尺度演变[J].*生态学报*, 2025,45(13):6454-6467.  
Huang Y, Li Y B, Li T, et al. Multi-scale evolution of the coupling relationship between ecosystem service value and human activity intensity in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45 (13):6454-6467.
- [16] 杨荣钦,肖玉磊,池苗苗,等.近20 a塔里木河流域人类活动及景观生态风险时空变化[J].*干旱区研究*,2024, 41(6):1010-1020.  
Yang R Q, Xiao Y L, Chi M M, et al. Temporal and spatial variations of human activities and landscape ecological risks in the Tarim River Basin, China, during the last 20 years [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(6): 1010-1020.
- [17] 丁金华,许艳秋,钱晶.苏南水网地区水域景观破碎化时空演变特征及驱动因子研究:以吴江区为例[J].*西北林学院学报*,2024,39(1):247-255.  
Ding J H, Xu Y Q, Qian J. Spatio-temporal evolution and driving factors of water landscape fragmentation in southern Jiangsu water network: a case study of Wujiang district [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(1):247-255.
- [18] 刘智才,郑伟雯,龙子涵,等.三江源地区人类活动强度指数建模及其与地表温度的空间关系[J].*应用基础与工程科学学报*,2025,33(2):349-361.  
Liu Z C, Zheng W W, Long Z H, et al. Modeling of human activity intensity index and its spatial relationship with land surface temperature in three-river source region [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2025, 33(2):349-361.
- [19] 吴伟,杨飞龄,王军军,等.基于MODIS时序数据的中国西南地区主要植被生态系统干扰动态监测及分析[J].*地理研究*,2021,40(5):1478-1494.  
Wu W, Yang F L, Wang J J, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecosystem disturbances in major vegetation types based on MODIS time series data in Southwest China [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5) : 1478-1494.
- [20] 樊华,赵翠薇.西南地区城镇化与生态韧性耦合协调关系研究[J].*水土保持研究*,2025,32(2):340-352.  
Fan H, Zhao C W. Research on the coupling coordination relationship between urbanization and ecological resilience in southwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):340-352.