

DOI: 10.5846/stxb202105311429

张晓宇, 宁晓刚, 王浩, 刘娅菲, 刘若文. 人类足迹对东北虎豹国家公园景观破碎化的影响. 生态学报, 2022, 42(11): 4688-4702.

Zhang X Y, Ning X G, Wang H, Liu Y F, Liu R W. Impact of human footprint on landscape fragmentation in the Northeastern China Tiger and Leopard National Park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4688-4702.

人类足迹对东北虎豹国家公园景观破碎化的影响

张晓宇^{1,2}, 宁晓刚^{2,*}, 王浩², 刘娅菲², 刘若文²

¹ 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000

² 中国测绘科学研究院, 北京 100036

摘要: 探讨人类活动对东北虎豹国家公园景观破碎化的影响, 对于掌握东北虎豹保护与人类发展之间的矛盾, 优化虎豹栖息环境具有重要意义。基于人类足迹理论构建适地化的人类足迹指标体系, 结合景观格局分析、回归分析、GIS 空间分析等方法, 从全局和局部两个角度探讨了各人类足迹指标对东北虎豹国家公园及核心保护区、一般控制区(虎豹潜在栖息地)、一般控制区(人口聚集区)三大管控分区景观破碎化的影响范围及其空间分异特征。结果表明:(1) 虎豹公园内较高、高度景观破碎化区域占公园全域面积的 8.96%, 且主要分布在一般控制区(人口聚集区)中, 占比高达 60.54%; (2) 从公园全域来看, 对景观破碎化的影响从高到低的人类足迹指标依次为土地利用状况、交通可达性、人口密度、工矿活动、夜间灯光强度与景观破碎化的相关性不显著; (3) 从各管控分区来看, 核心保护区、一般控制区(虎豹潜在栖息地)与公园全域具有相似的规律, 而在一般控制区(人口聚集区)中, 工矿活动的影响程度上升到第二位; (4) 从区域上占主导的人类足迹指标来看, 以土地利用状况影响为主的区域最为广泛; 以交通可达性影响为主的区域分布在春化镇、大肚川镇、春阳镇周边地区; 以人口密度影响为主的区域分布在罗子沟镇、复兴镇周边地区; 以工矿活动影响为主的区域最小, 分布在工矿业较为集中的罗子沟镇周边地区。

关键词: 人类足迹; 东北虎豹国家公园; 景观破碎化; 回归分析; 空间分异

Impact of human footprint on landscape fragmentation in the Northeastern China Tiger and Leopard National Park

ZHANG Xiaoyu^{1,2}, NING Xiaogang^{2,*}, WANG Hao², LIU Yafei², LIU Ruowen²

¹ School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

² Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100036, China

Abstract: Assessing the impacts of human activities on landscape fragmentation of the Northeastern China Tiger and Leopard National Park (NCTL-NP) is of great significance for balancing the conflict between the wildlife protection and urbanization, and optimizing the habitat of the tiger and leopard. In this paper, we designed three steps to evaluate the impact of human activities on landscape fragmentation of the NCTL-NP. Firstly, according to the human footprint theory, we selected five indexes, population density, land-use status, industrial and mining activities, accessibility, and nighttime lights intensity to establish a localized index system of human footprint. Then, we selected patch density (PD), edge density (ED), landscape division (DIVISION), and Shannon's diversity index (SHDI) at the landscape scale to represent the degree of landscape fragmentation. Finally, we analyzed the impact of human footprint on the landscape fragmentation and its spatial variation in the three functional zones (core reserve, the potential habitats of the tiger and leopard, and population agglomeration zone) of the NCTL-NP. The results showed that high and very high fragmented areas, accounting for 8.96% of the NCTL-NP, were mainly distributed in the population agglomeration zone and covered up to 60.54% of the

基金项目: 自然资源专项监测评价项目(A2010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(AR2117)

收稿日期: 2021-05-31; **网络出版日期:** 2022-02-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ningxg@casm.ac.cn

zone. Overall, the factor influencing landscape fragmentation most was land-use status, followed in order by accessibility, population density and industrial and mining activities. While the nighttime light intensity was not significantly related to landscape fragmentation. These trends were found similar in the core reserve and the potential habitats of the NCTL-NP, while the impact of industrial and mining activities on landscape fragmentation in the population agglomeration zone, although still smaller than land-use status, was larger than accessibility and population density. In terms of regions of the dominant human footprint indexes, the areas where the landscape fragmentation is mainly influenced by land-use status were the largest. The areas where the landscape fragmentation was most influenced by accessibility were distributed in the surrounding areas of Chunhua Town, Daduchuan Town and Chunyang Town. The areas where the landscape fragmentation was most influenced by population density were distributed in the surrounding areas of Luozigou Town and Fuxing Town. The area where the landscape fragmentation was most influenced by industrial and mining activities was the smallest, and it was mainly distributed in the surrounding areas of Luozigou Town. We suggest that the government should take some measures to reduce human activities in areas with severely fragmented landscapes to optimize the habitat of the tiger and leopard.

Key Words: human footprint; Northeastern China Tiger and Leopard National Park; landscape fragmentation; regression analysis; spatial differentiation

建立国家公园体制是新时代中国特色社会主义生态文明建设的重要内容,对于有效保护国家重要自然生态系统的原真性、完整性^[1],促进人与自然和谐共生,具有极其重要的意义。尽管目前我国国家公园体制建设取得了相当大的进展^[2],但依然普遍存在能源建设、矿产开采、居民生活、农业开垦、道路建设等人类活动,致使自然生境破碎、生物多样性降低,严重影响着国家公园的生态系统服务功能^[3-4]。因此,量化评价国家公园范围内人类活动对自然生态系统的影响程度、识别空间分异规律显得尤为迫切且意义重大。

人类足迹(Human Footprint)是从人类活动压力变化角度来量化评价人类活动影响程度的一种方法^[5],相较于人类活动强度指数^[6]、人为干扰度^[7]、陆地表层人类活动强度^[8]等从土地利用状态变化角度出发的评价方法,人类足迹通过选取与人类活动直接相关的空间因子对人类活动进行表达,能够更加全面客观的反映人类活动影响程度。2002年,Sanderson等^[9]首次提出了人类足迹指数(Human Footprint Index, HFI)模型,利用人口密度、土地利用变化、通达性及电力基础设施4个方面的9个评价指标进行影响力赋值和叠加计算,最终得到全球陆地范围内1km格网的人类足迹数据。该方法能够直观体现人类活动在区域上的空间分布差异,因此在生态保护区域中应用广泛。如Woolmer等^[10]利用90m×90m分辨率的空间数据,在Sanderson的研究基础上引入工矿、大坝和其他基础设施等指标,制备了适用于北阿巴拉契亚/阿卡迪亚生态保护区的人类足迹数据,更加精细化的体现出生态保护区域中人类活动的复杂性。随后人类足迹方法在苏格兰的凯恩戈姆斯国家公园和洛蒙德湖与特罗萨克斯山国家公园^[11]、厄瓜多尔东南部的罗汉松国家公园^[12]等地均有应用。我国的研究学者分别将人类足迹指数模型应用于横断山区^[13]、青藏高原^[14]、台湾日月潭国家公园^[15]等生态保护区,并通过分析保护区内外人类足迹的空间分布差异,评估建立保护区对于减少人类活动影响的有效性。综上,目前关于生态保护区人类足迹的研究均从评价指标的选择和细化赋值入手,然后将各指标层进行空间叠加,最后根据叠加得到的人类足迹指数值直接判断人类活动的影响程度,但并未探讨各人类足迹指标对自然生态系统的影响。

作为景观生态学的重要研究内容,景观破碎化(Landscape Fragmentation)是指由于受到外界干扰所导致的景观由单一、均质和连续的整体趋向复杂、异质和不连续的斑块镶嵌体^[16],在一定程度上能够直观反映自然生态系统受到人类活动影响的程度。鉴于此,本文基于人类足迹理论,以东北虎豹国家公园为研究区域,以2019年为研究时间点,构建适地化的人类足迹指标体系,并借助景观格局分析、回归分析、GIS空间分析等方法,从全局和局部两个角度上深入探讨各人类足迹指标对东北虎豹国家公园及不同管控分区景观破碎化的影响范围及其空间分异特征,以期对东北虎豹国家公园生态修复与人类活动的合理管控提供参考依据。

1 研究区概况

东北虎豹国家公园(简称“虎豹公园”)体制试点正式启动于2017年1月,是我国首个由中央直管的国家公园,其园区位于吉林省和黑龙江省交界处(129°05'—131°19'E,42°39'—44°15'N),东部、东南部与俄罗斯豹地国家公园接壤,西南部隔图们江与朝鲜相邻,行政区划涉及吉林省延边朝鲜族自治州珲春、汪清、图们和黑龙江省牡丹江市东宁、穆稜、宁安6个县(市),总面积14612km²(图1)。

按照国土空间和自然资源用途管制要求,遵循生态系统完整性、原真性和保护发展协调性三大原则,虎豹公园试点区划分为核心保护区与一般控制区^[17],分别占虎豹公园试点区总面积的52%和48%。其中,核心保护区是维护现有虎豹种群正常繁衍、迁移的关键区域,主要包括近年来监测确认的东北虎豹繁殖家域、定居区及活动频繁的区域。一般控制区是恢复虎豹适宜栖息地及探讨人与自然和谐发展的关键区域,该区域将东北虎豹种群扩散栖息地、迁移廊道等划为虎豹潜在栖息地;将部分乡镇驻地,以及人口数量较大的林场场部、村屯及周边农业耕种区划为人口聚集区。长久以来,虎豹公园内传统的生产生活方式使得人类活动空间与东北虎豹栖息地和潜在栖息地空间高度重叠,农业用地、居民点、工矿企业、道路铁路穿插,严重压缩和分割了东北虎豹的生存空间,虎豹栖息地破碎化问题突出。

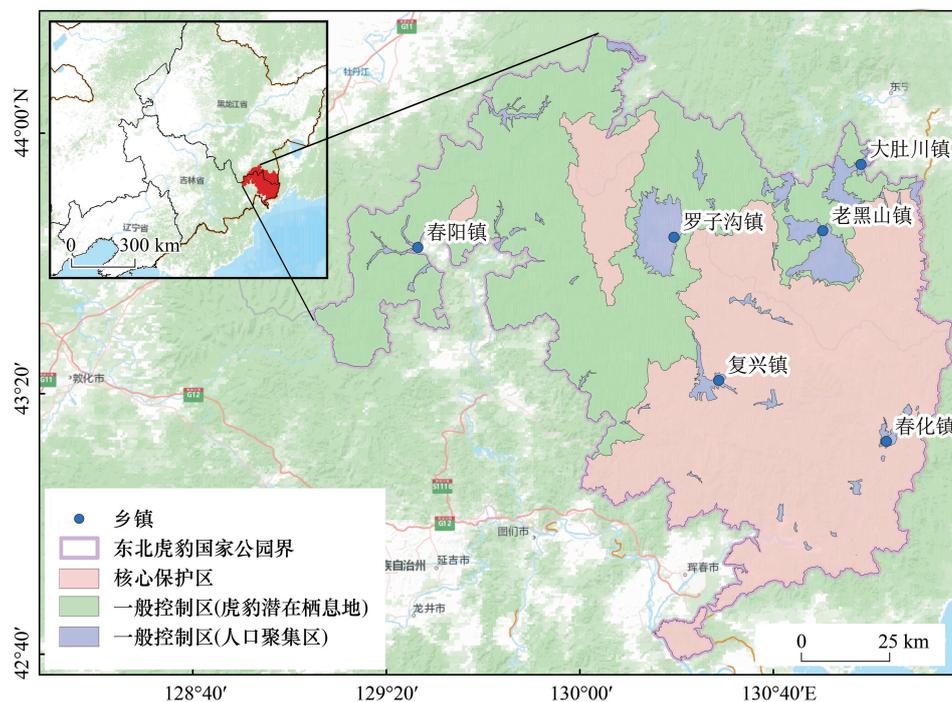


图1 东北虎豹国家公园地理位置

Fig.1 Geographical location of NCTL-NP

NCTL-NP: 东北虎豹国家公园, Northeastern China Tiger and Leopard National Park

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本文采用的数据包括虎豹公园试点区及管控分区矢量边界数据、地表覆盖数据、人口密度数据、夜间灯光数据。其中矢量边界数据来源于吉林省延边朝鲜族自治州汪清县林草部门;地表覆盖数据来源于2019年基础性地理国情监测成果数据,数据生产所使用的影像空间分辨率优于2m,并通过外业核实和质量检查保证数据质量;人口密度数据采用美国国家橡树岭实验室(<https://landscan.ornl.gov/landscan-datasets>)开发的

LandScan 全球人口动态统计分析数据库,空间分辨率为 30";夜间灯光数据来源于美国科罗拉多矿业大学 EOG 小组官网(<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)提供的 NPP/VIIRS 年度产品,空间分辨率为 15"。

为充分体现研究区内的景观异质性,以 2019 年《基础性地理国情监测内容与指标》(CH/T 9029—2019)为基础,并参考前人对于自然保护区土地利用分类方法^[18-19],将种植土地中的水田、旱地和构筑物中的温室、大棚合并为耕地;将种植土地中的果园、其他经济苗木合并为园地;将林草覆盖拆分为林地和草地;将构筑物中除温室、大棚外的其他地类以及房屋建筑(区)、铁路与道路、人工堆掘地合并为建设用地,最终得到耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域、荒漠与裸露地 7 种土地利用类型(图 2),用于景观格局指数的计算。

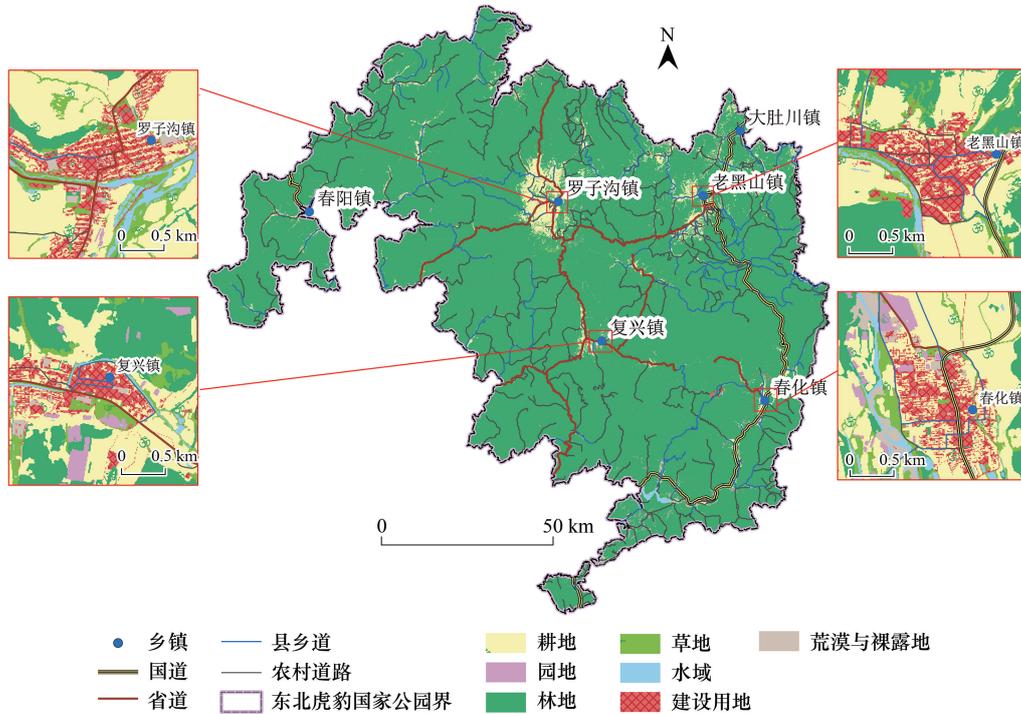


图 2 东北虎豹国家公园 2019 年土地利用覆盖分布

Fig.2 Land use coverage distribution of NCTL-NP in 2019

人口密度、夜间灯光、重新分类的土地利用覆盖,以及基础性地理国情监测成果中的道路要素数据用于构建人类足迹指标体系。由于各数据源在分辨率、投影和空间范围等方面存在不一致,因此在开展研究之前,需要根据研究区范围统一进行投影转换和裁剪。此外,人口密度和夜间灯光数据还需要进行降噪等校正处理,并综合考虑各数据的分辨率,最终采用最邻近法生成 100m×100m 分辨率数据。

2.2 研究方法

2.2.1 人类足迹指标体系的构建

本文在 Sanderson 等人^[9]构建的人类足迹指数方法的基础上,结合虎豹公园内的实际人类活动影响情况^[20],考虑数据的可获取性,最终选用人口密度、土地利用状况、工矿活动、交通可达性、夜间灯光 5 个与人类活动直接相关的指标来定量评价公园内的人类足迹,具体选取原则如表 1 所示。

2.2.2 人类足迹指标的离散化赋值

为便于统一比较各人类足迹指标之间的大小关系,本文对各指标的栅格数据进行重新赋值,赋值范围为 0—10,值越大表示人类足迹影响程度越大,最终得到各人类足迹指标空间分布图(图 3)。具体赋值方法如下:

表 1 人类足迹指标选取原则

Table 1 Principles for the selection of human footprint index

| 指标 Index | 指标含义 Index meaning | 选取依据 Selection basis |
|--|-------------------------------|---|
| 人口密度 Population density | 人口聚集程度 | 人口密度越高,对生态系统资源的需求越大,对生态系统的影响也越大 ^[21] |
| 土地利用状况 Land-use status | 自然客观条件和人类生产生活对地表的综合作用情况 | 人类对各种地表覆盖类型的利用程度不同,导致其对自然生态系统造成的影响也不同 ^[22] |
| 工矿活动 Industrial and mining activities | 工业生产、矿产开发等活动 | 工矿活动使得地表破坏严重,并对周边一定范围内的自然生态系统平衡造成威胁 ^[23] |
| 交通可达性 Traffic accessibility | 人类利用某种特定的交通系统从某一地点到达另一地点的便利程度 | 道路网络为人类提供了通向自然的通道 ^[24] ,而交通可达性随着道路等级的升高而升高,人类对道路沿线生态系统的影响程度也随之增大 ^[25] 。 |
| 夜间灯光 Nighttime lights | 人类夜间活动程度 | 反映区域社会经济发展水平及电力基础设施建设情况 ^[26] |

(1) 人口密度

本文参考 Venter 等^[24]对人口密度的赋值方法,将人口密度大于 1000 人/km²的栅格赋值为 10,对于小于 1000 人/km²的栅格按照对数方程进行计算赋值,具体计算方程如下:

$$\text{pop}_{\text{score}} = 3.333 \times \log(\text{pop}_{\text{density}} + 1) \quad (1)$$

式中, $\text{pop}_{\text{score}}$ 表示该栅格数据重新赋值的分数, $\text{pop}_{\text{density}}$ 表示各栅格像元的人口密度值。

(2) 土地利用状况

本文结合虎豹公园土地利用分类标准,参考段群滔等^[27]的研究成果,为公园内 7 种地类匹配相应的影响值。其中,建设用地受人类活动影响最大,赋值为 10;其次为耕地,影响力赋值为 8;园地影响力赋值为 6;草地影响力赋值为 2;林地、水域及荒漠与裸露地的影响力赋值为 0。

(3) 工矿活动

提取基础性地理国情监测数据中的露天采掘场、尾矿堆放物及工业设施来表征工矿活动。本文设置工矿活动对生态系统的最大影响距离为 10000m^[10],将距离大于 10000m 的栅格赋值为 0,对于距离小于 10000m 的栅格参考 InVEST 模型生境质量模块中的距离衰减函数^[28-29]来表示工矿活动得分,具体计算公式如下:

$$gk_{\text{score}} = \exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{\text{max}}}\right)d_{\text{density}}\right] \times 10 \quad (2)$$

式中, gk_{score} 表示该栅格数据重新赋值的分数, d_{density} 表示经过欧氏距离计算的栅格数据值, d_{max} 表示工矿活动的最大影响距离,即 10000m。

(4) 交通可达性

本文参考 Woolmer 等^[10]对道路的赋值方法,结合公园内各等级道路及铁路的分布情况,将交通可达性分为 5 个数据层,同时根据两侧距离进行重分类赋值(表 2)。最后将重分类后的 5 个数据层进行等权叠加,并采用 Min-Max 标准化法将叠加后的栅格结果进行标准化处理,使其分数范围与其他人类足迹指标统一,具体公式如下:

$$dl_{\text{score}} = \frac{dl_{\text{density}} - dl_{\text{min-density}}}{dl_{\text{max-density}} - dl_{\text{min-density}}} \times 10 \quad (3)$$

式中, dl_{score} 表示叠加后栅格数据经过标准化处理的分数, dl_{density} 表示叠加后的栅格数据值, $dl_{\text{max-density}}$ 表示叠加后栅格数据中的最大值, $dl_{\text{min-density}}$ 表示叠加后栅格数据中的最小值。

(5) 夜间灯光

将经过预处理后的 NPP/VIIRS 夜间灯光数据中 DN 值等于 0 的栅格赋值为 0,再利用分位数分级法将 DN 值大于 0 的栅格赋值为 1—10。

2.2.3 景观破碎化分析方法

综合考虑研究区域的景观类型及分布特点,本文在景观尺度上,从面积、形状、聚散性、多样性 4 个方面分

别选取斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、景观分离度(DIVISION)、香农多样性指数(SHDI)来表征研究区景观破碎化程度,各指数计算方法及生态学意义参见《景观生态学—格局、过程、尺度与等级》^[30]。根据研究区范围大小,本文分别设定边长为300m、600m、900m、1200m、1500m、1800m、2100m、2400m、2700m的正方形移动窗口计算并生成景观指数栅格图。从图4中可以看出,各景观指数曲线在1200—1500m尺度趋于缓和。由于窗口设置过小将导致生成的栅格图像缺乏连续性;窗口设置过大则会导致生成的栅格图像模糊,综合考虑最终选取1500m为最佳研究尺度。

表2 交通可达性赋值

Table 2 Traffic accessibility assignment

| 数据层 Data layer | 0—90m | 90—500m | 500—1000m | 1000—3000m |
|--------------------|-------|---------|-----------|------------|
| 国道 National road | 8 | 6 | 4 | 2 |
| 省道 Provincial road | 6 | 4 | 2 | 0 |
| 县乡道 County road | 5 | 3 | 1 | 0 |
| 农村道路 Rural road | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 铁路 Railway | 8 | 6 | 0 | 0 |

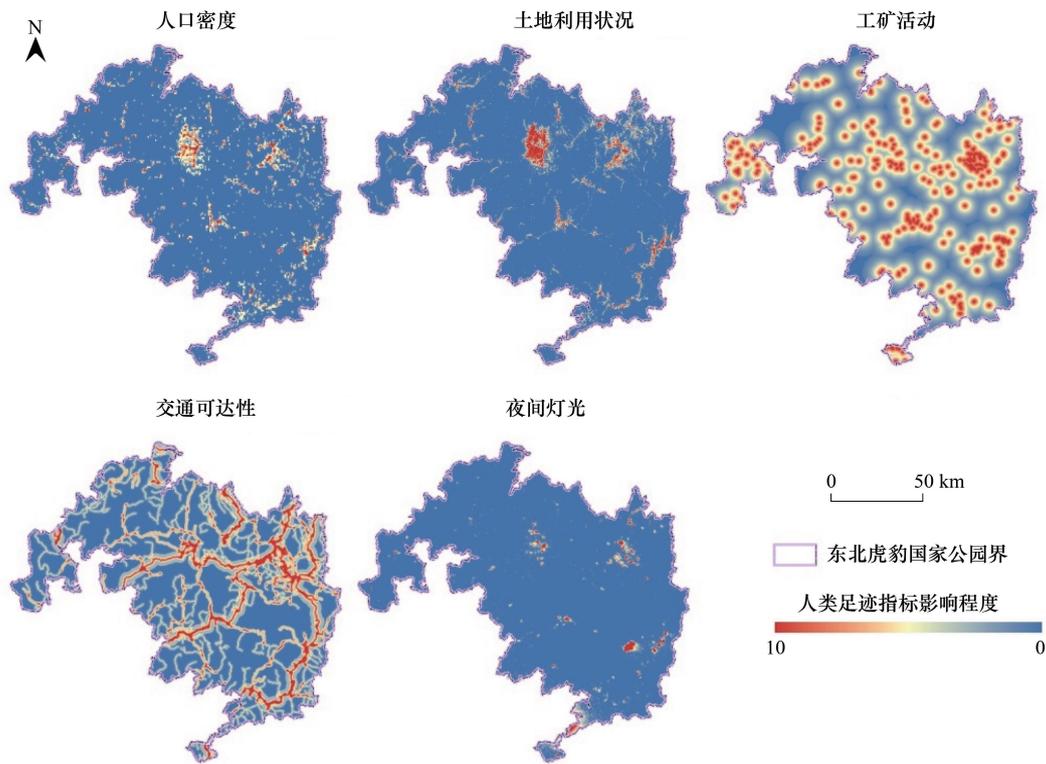


图3 各人类足迹指标空间分布

Fig.3 Spatial distribution of each human footprint index

2.2.4 人类足迹对景观破碎化影响分析方法

(1) 全局水平影响分析方法

普通最小二乘(Ordinary Least Squares, OLS)模型是一种常用于探索解释变量与因变量之间全局关系的线性回归模型。本文以景观破碎化作为因变量,以5种人类足迹指标作为解释变量,建立回归方程并得到每个解释变量的回归系数,通过对比该系数大小确定各指标影响程度。其方程形式如下:

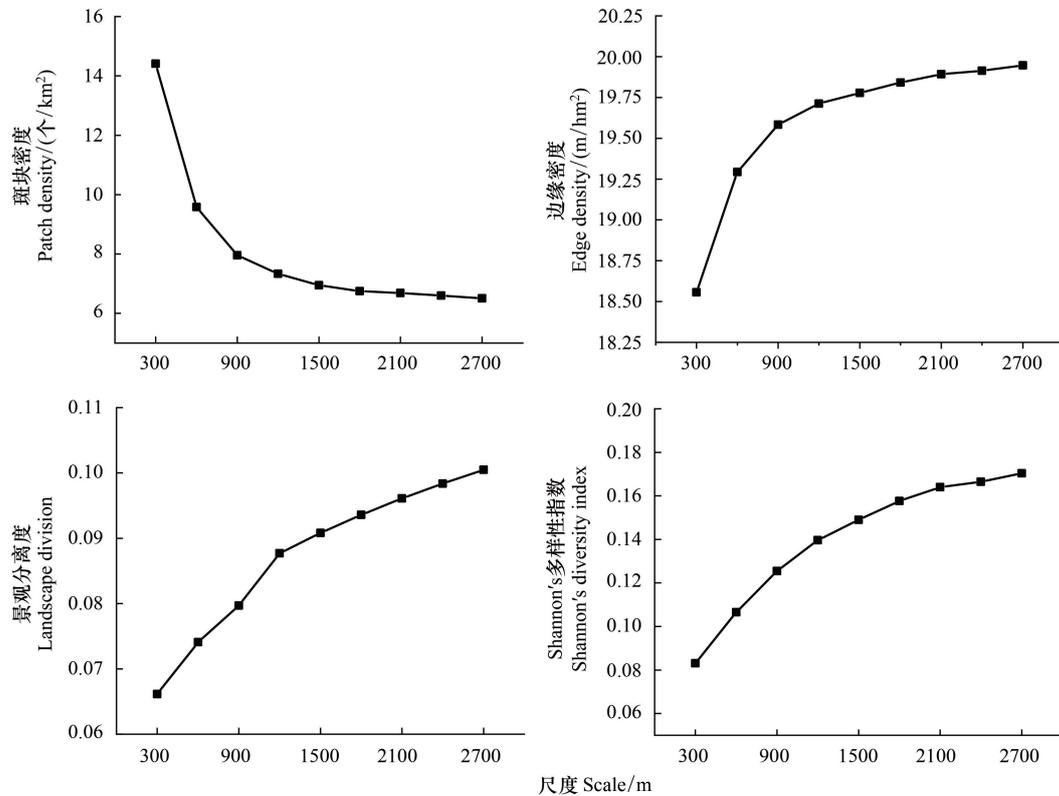


图4 景观指数随窗口尺度变化曲线

Fig.4 Variation curve of landscape index with window scale

$$y_i = \beta + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中, y_i 是空间 i 位置的景观破碎化指数; β 为二乘法空间截距; β_k 为第 k 项自变量(人类足迹指标)的回归系数; x_{ik} 为第 k 项人类足迹指标在空间 i 位置的取值; ε_i 为误差修正项。

(2) 局部水平影响分析方法

1) 空间自相关检验

在构建地理加权回归模型之前,需要对研究区域内各变量进行空间自相关检验,确定各变量值之间是否存在相互依赖性。本文采用应用较为广泛的全局 Moran's I 指数来检验区域内各变量是否具有空间相关性。其计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中, n 为研究区域内空间单元的总数; x_i 和 x_j 分别代表第 i 个和第 j 个空间单元上的变量值, w_{ij} 是单元 i 和单元 j 之间的空间权重矩阵; S_0 是所有空间权重矩阵之和。

2) 地理加权回归模型

地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型将数据的空间位置嵌入到回归方程中,通过建立空间范围内每个位置点的局部回归方程,来探索研究对象在某一尺度下的空间变化及相关驱动因素。本文通过构建 GWR 模型以获得不同人类足迹指标随空间地理位置变化而变化的回归系数,该系数代表了人类足迹指标对景观破碎化的影响程度。其方程形式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, y_i 是空间 i 位置的景观破碎化指数; (u_i, v_i) 为 i 位置点的空间坐标; β_0 和 β_k 分别为空间 i 位置的截距和局部回归系数; x_{ik} 为第 k 项人类足迹指标在空间 i 位置的取值; ε_i 为误差修正项。

3 结果与分析

3.1 景观破碎化空间分布格局

为避免表征景观破碎化的 4 个指数存在信息重叠,故通过主成分分析法将 4 个指数综合成一组新的综合指标来表征景观破碎化,具体结果如表 3 所示。

表 3 景观指数主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis of landscape index

| 景观指数 Landscape index | KMO | 公因子方差 Common factor variance | | 成分 Components | 特征值 Eigenvalue | 初始特征值 Initial eigenvalue | | 主成分 Principal components 1 |
|----------------------------|-----|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--|---|-------------------------------------|
| | | 初始 Initial | 提取 Extraction | | | 方差贡献率/% Variance contribution rate | 累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate | |
| | | PD | 0.795 | | | 1.00 | 0.882 | |
| ED | | 1.00 | 0.971 | 2 | 0.196 | 4.911 | 98.451 | 0.985 |
| DIVISION | | 1.00 | 0.924 | 3 | 0.035 | 0.881 | 99.332 | 0.961 |
| SHDI | | 1.00 | 0.964 | 4 | 0.027 | 0.668 | 100.000 | 0.982 |

KMO: 抽样适合性检验, Kaiser-Meyer-Olkin; PD: 斑块密度, Patch Density; ED: 边缘密度, Edge Density; DIVISION: 景观分高度, Landscape Division; SHDI: 香农多样性指数, Shannon's Diversity Index

其中 KMO 检验指数达到 0.795, 满足因子分析的条件, 第一成分的方差贡献率达到了 93.54%, 有且只有一个主成分。进一步计算各指数的综合模型得分和归一化权重, 最终得到景观破碎化综合指数表达式为:

$$LFCI = Z_{PD} \times 0.2428 + Z_{ED} \times 0.2547 + Z_{DIVISION} \times 0.2485 + Z_{SHDI} \times 0.2539 \quad (6)$$

式中, LFCI 为景观破碎化综合指数值, Z_{PD} 、 Z_{ED} 、 $Z_{DIVISION}$ 、 Z_{SHDI} 为 PD、ED、DIVISION、SHDI 标准化后的数值。利用自然间断点法将 LFCI 分为五个等级并按照管控分区进行统计, 以定量化表示各管控分区内的景观破碎化程度及空间分布差异(表 4、图 5)。

表 4 各分区中景观破碎化程度面积占比/%

Table 4 Percentage of area of landscape fragmentation in each zoning district

| 分区 Zoning | 低 Low | 较低 Lower | 中度 Moderate | 较高 Higher | 高 High |
|--|----------|-------------|----------------|--------------|-----------|
| 全域 Full area | 58.61 | 23.38 | 10.05 | 5.65 | 2.31 |
| 核心保护区 Core protection zone | 62.01 | 26.04 | 7.87 | 3.12 | 0.96 |
| 一般控制区(虎豹潜在栖息地) General control zone (potential habitat for tigers and leopards) | 61.69 | 22.24 | 10.98 | 4.40 | 0.69 |
| 一般控制区(人口聚集区) General control zone (population agglomeration zone) | 8.78 | 8.44 | 22.24 | 35.71 | 24.83 |

从表 4、图 5 中可以看出, 虎豹公园景观破碎化整体上呈现“北高南低”的空间分布格局, 且以低、较低破碎化为主, 但仍有 8.96% 的区域为较高、高度破碎化。其中, 核心保护区内较高、高度破碎化地区面积占该区域总面积的 4.08%, 主要分布于公园东南部, 呈条带状分布; 虎豹潜在栖息地内较高、高度破碎化地区面积占该区域总面积的 5.09%, 主要分布于该区域内的人类居住点周围, 呈点状分布; 人口聚集区内较高、高度景观破碎化地区则占到该区域面积的 60.54%, 且以罗子沟镇、老黑山镇、复兴镇、春化镇、春阳镇等乡镇驻地为中心向外围扩散。

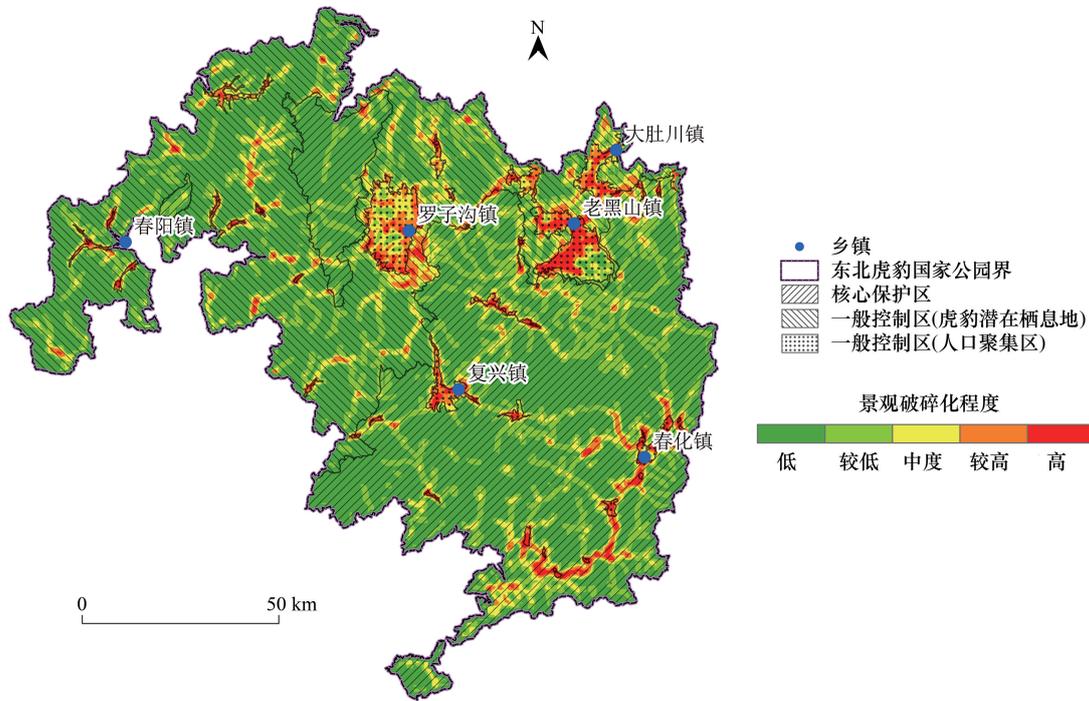


图 5 景观破碎化空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution pattern of landscape fragmentation

3.3 人类足迹对景观破碎化影响分析

结合景观破碎化分析确定的 1500m 正方形格网最佳研究尺度成果,将研究区域划分为 7006 个网格单元,以分区统计 5 种人类足迹指标和景观破碎化综合指数。

3.3.1 全局影响因素分析

OLS 模型计算结果如表 5 所示,其中 VIF 为方差膨胀系数,一般认为当 VIF 大于 10 时,各变量间存在明显的多重共线性^[31]。本文中 5 种人类足迹指标的 VIF 值均小于 10,因此各指标不存在多重共线性问题。从显著性检验水平来看,5 种人类足迹指标中只有夜间灯光未通过 0.05 水平显著性检验,这表明在全局水平上,LFCI 与夜间灯光的相关关系不具有统计学意义。由于虎豹公园内以第一产业为主,社会经济水平较低,电力基础设施建设相对薄弱,夜间灯光集中分布在各乡镇驻地及周围地区,不足以对当地景观格局产生影响,导致夜间灯光对景观破碎化的解释能力不显著。

表 5 OLS 模型回归结果

Table 5 OLS model regression results

| 因变量 Dependent variable | 解释变量 Explanatory variables | 回归系数 Regression coefficient | t | P | VIF |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|---------|-------|
| LFCI | 人口密度 | 0.224 | 17.256 | 0.000 * | 3.003 |
| | 土地利用状况 | 0.332 | 28.015 | 0.000 * | 2.502 |
| | 工矿活动 | 0.148 | 18.014 | 0.000 * | 1.206 |
| | 交通可达性 | 0.289 | 31.882 | 0.000 * | 1.466 |
| | 夜间灯光 | 0.008 | 1.077 | 0.281 | 1.081 |

OLS:普通最小二乘,Ordinary Least Squares;LFCI:景观破碎化综合指数,Landscape Fragmentation Composite Index;VIF:方差膨胀系数,Variance Inflation Factor;* 为在 0.05 水平上显著

从回归系数来看,LFCI 与其余 4 项人类足迹指标均呈正向相关,且土地利用状况之间的回归系数最大,达 0.332。表明在全局水平上,土地利用状况影响力每增加 1%,景观破碎化综合指数增加 33.2%,其他 3 项人

类足迹指标影响效应从高到低依次为交通可达性(0.289)、人口密度(0.224)、工矿活动(0.148)。

3.2.2 局部影响因素分析

(1)空间自相关检验结果分析

通过 OLS 模型的计算结果可知,夜间灯光与景观破碎化之间的回归关系不显著,因此在进行 GWR 模型计算之前,首先将夜间灯光这一指标剔除,以保证 GWR 模型拟合结果的准确性。从图 6 可以看出,因变量景

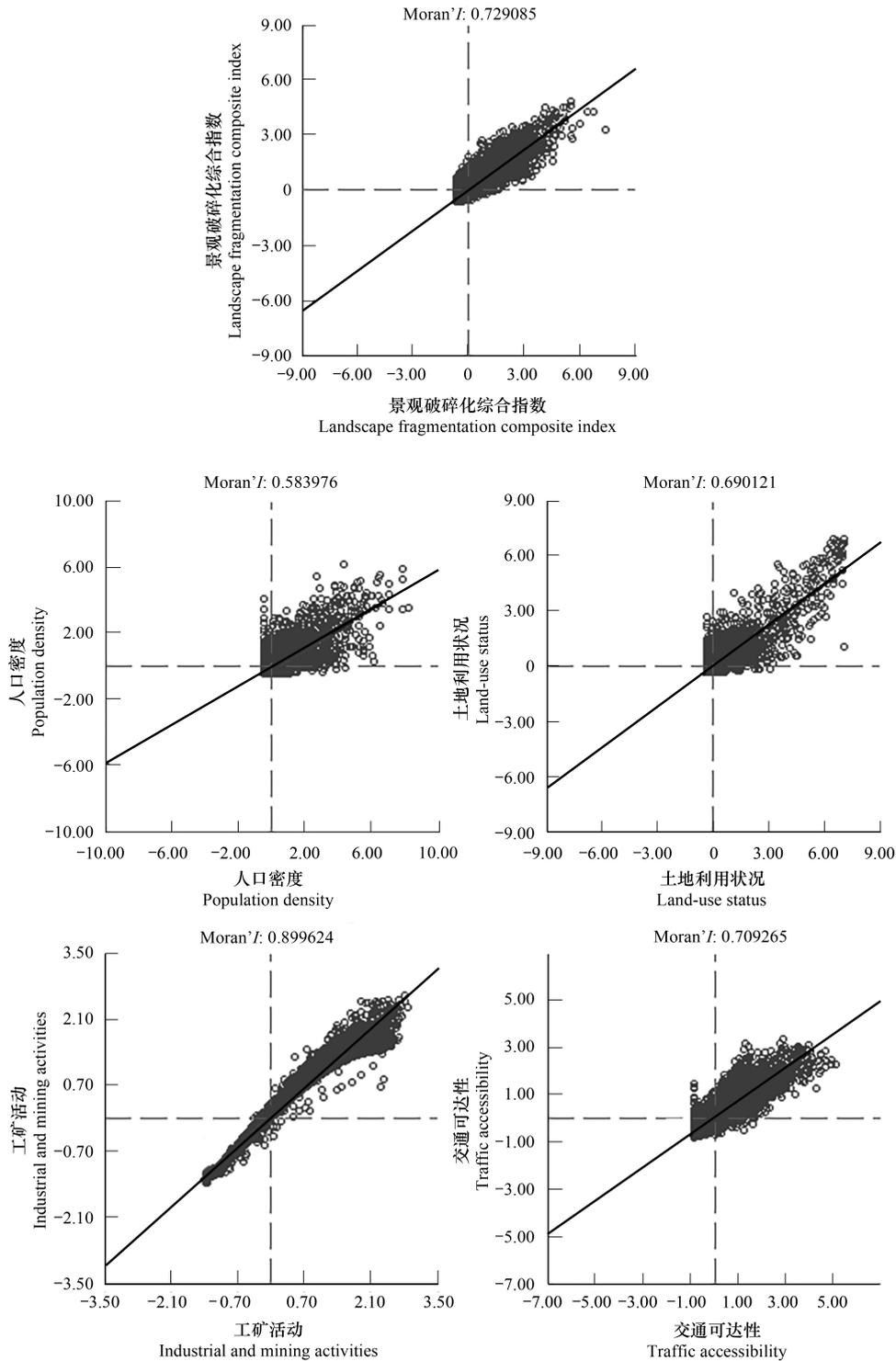


图 6 各变量 Moran's I 指数散点图

Fig.6 Scatter plot of Moran's I index for each variable

景观破碎化综合指数 LFCI 和剩余解释变量(人口密度、土地利用状况、工矿活动、交通可达性)的 Moran's *I* 指数散点图均沿一、三象限角平分线分布,聚集特征(高-高值或低-低值)较为明显,其结果在 0.01 极显著水平上通过检验 ($Z > 2.58$),说明上述各变量的空间分布存在较强的空间自相关性,因此可以构建地理加权回归模型进一步分析各人类足迹指标对景观破碎化的影响。

(2) 各人类足迹指标对景观破碎化的定量影响

采用自然间断点法对 GWR 模型回归系数进行分级,得到 LFCI 与各人类足迹指标相关性空间格局(图 7)。总体来看,LFCI 与各人类足迹指标回归系数的空间格局呈现集聚状态,且以正向为主,表明各项人类足迹指标与 LFCI 均呈现出较强的正向相关性。其中,土地利用状况的回归系数高值区明显高于其他指标,为 1.17—2.41,占公园全域面积的 6.80%,且大部分位于核心保护区和虎豹潜在栖息地,仅有 0.34%位于人口聚集区。空间上主要分布于公园南部、东部;人口密度的回归系数高值区(0.52—0.81)占全域面积的 8.96%,其中有 53.45%位于核心保护区,37.41%位于虎豹潜在栖息地,9.14%位于人口聚集区。空间上主要分布于公园南部、东部;工矿活动的回归系数高值区(0.46—0.73)占全域面积的 2.01%,且有 44.22%位于人口聚集区。空间上主要分布于公园中部以罗子沟

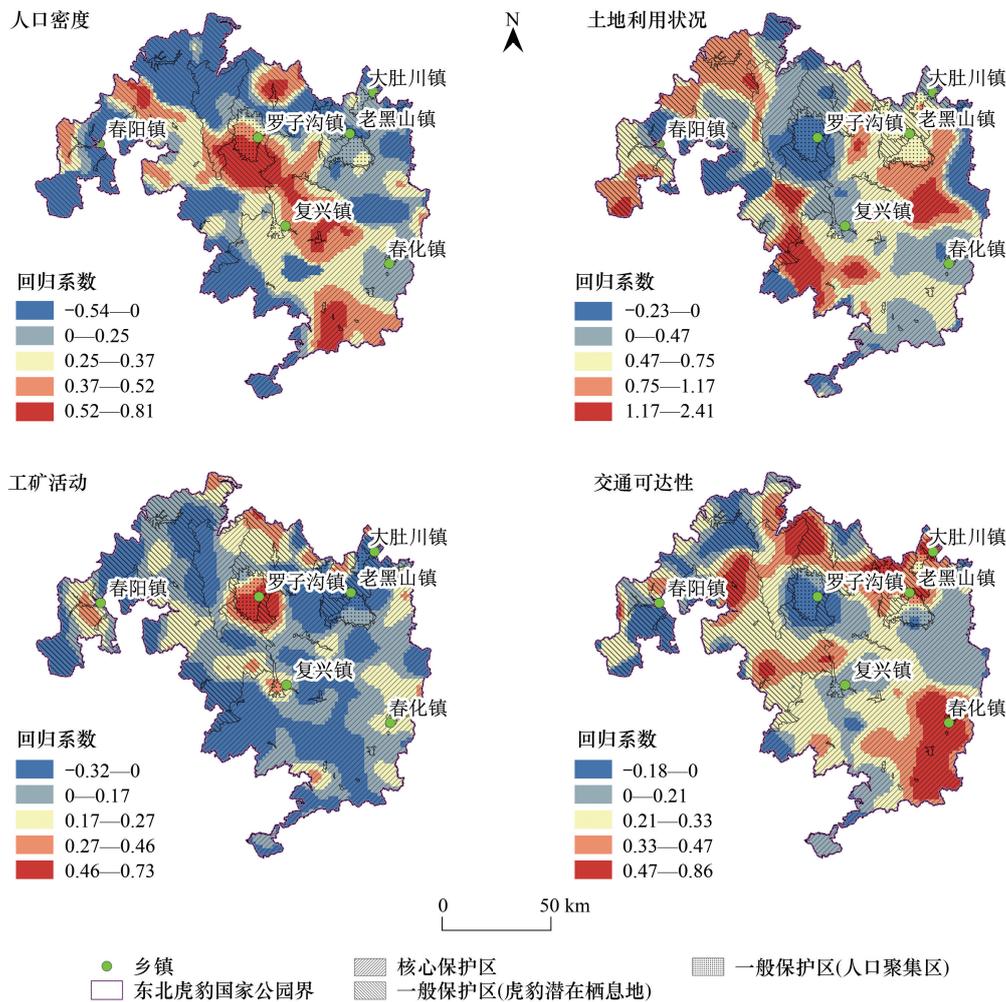


图 7 LFCI 与各人类足迹指标相关性空间格局

Fig.7 Spatial pattern of regression coefficients of LFCI and each human footprint index

LFCI: 景观破碎化综合指数, Landscape Fragmentation Composite Index

镇为中心的人口聚集区及其周围;交通可达性的回归系数高值区(0.47-0.86)占全域面积的 13.03%,且有 55.81%和 37.40%位于核心保护区和虎豹潜在栖息地。空间上主要分布于公园东部春化镇及周边地区,东北部老黑山镇、大肚川镇及周边地区,在北部、西部也有一定分布。

(3) 景观破碎化的主导人类足迹指标区域面积占比

从各回归系数的显著性水平来看,在 7006 个网格单元中,仅有 1.78%未通过 0.05 水平显著性检验,主要分布于数据质量较差的边界地区。为确定虎豹公园景观破碎化的最大影响因素,分析通过显著性检验的剩余网格单元中回归系数正向最大值,并以管控分区进行统计分析。从图 8 中可以看出,土地利用状况影响为主要的区域占公园全域面积的 61.04%,其次为交通可达性(18.70%)、人口密度(14.72%),这也表明 GWR 模型与全局水平上 OLS 模型回归结果一致。从各管控分区来看,核心保护区与虎豹潜在栖息地中景观破碎化的各影响因素面积占比与公园全域基本一致,而在人口聚集区中,除土地利用状况外,工矿活动的影响范围较大,占人口聚集区面积的 19.37%,其次为交通可达性(15.21%)、人口密度(14.69%)。

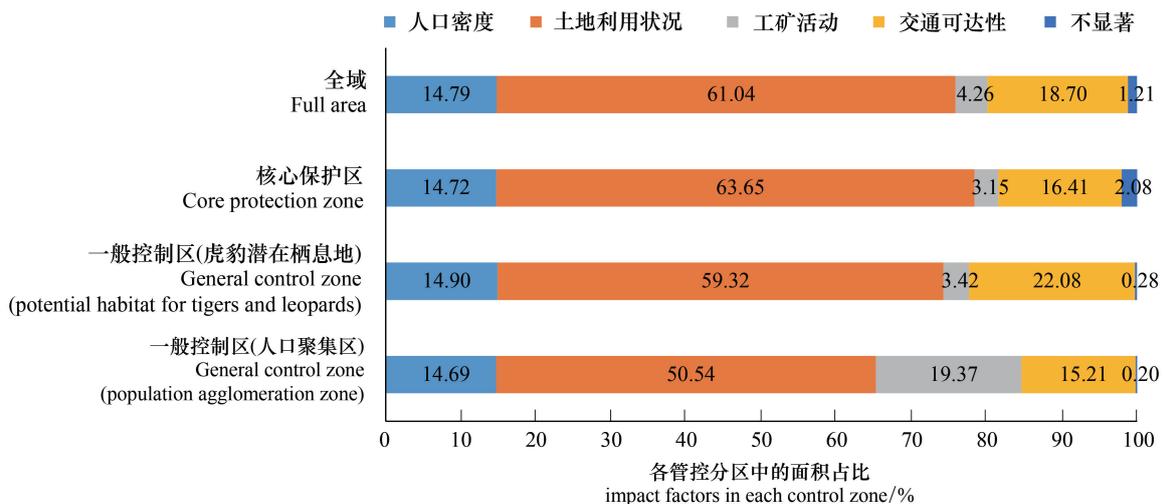


图 8 LFCI 最大影响因素在各管控分区中的面积占比/%

Fig.8 Area share of LFCI maximum impact factors in each control zone

(4) 景观破碎化的主导人类足迹指标空间格局分析

从图 9 中可以看出,景观破碎化以土地利用状况影响为主要的区域最为广泛,主要分为三大集中连片区,其中东部连片区范围最大,涵盖了核心保护区大部,虎豹潜在栖息地的部分地区以及以复兴镇、老黑山镇、大肚川镇为中心的人口聚集区,而西北部和西部连片区则主要位于虎豹潜在栖息地中。受交通可达性影响为主要的景观破碎化区域主要集中分布于公园东部春化镇及周边地区、东北部大肚川镇部分地区、西部春阳镇及周边地区以及公园北部地区,其中东部春化镇附近及公园北部地区的交通可达性对核心保护区影响较大,西部春阳镇附近的交通可达性对虎豹潜在栖息地影响较大。以人口密度影响为主导的区域呈现大集中、小分散的特征,主要分布在公园中部罗子沟镇、复兴镇附近地区,此外在东部边境地区、核心保护区南部及其他地区一些小型居民点周围均有分布。工矿活动的影响区域最小,主要分布在公园中部工矿业较为集中的罗子沟镇及周边地区,且对核心保护区东北部地区也存在一定影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

我国东北虎豹目前主要分布于老爷岭、张广才岭和完达山 3 个区域,其中虎豹公园覆盖了老爷岭分布区的核心区域,对俄罗斯西南滨海边疆区域和我国老爷岭区域分布的东北虎豹种群的保护有着重大意义^[32]。

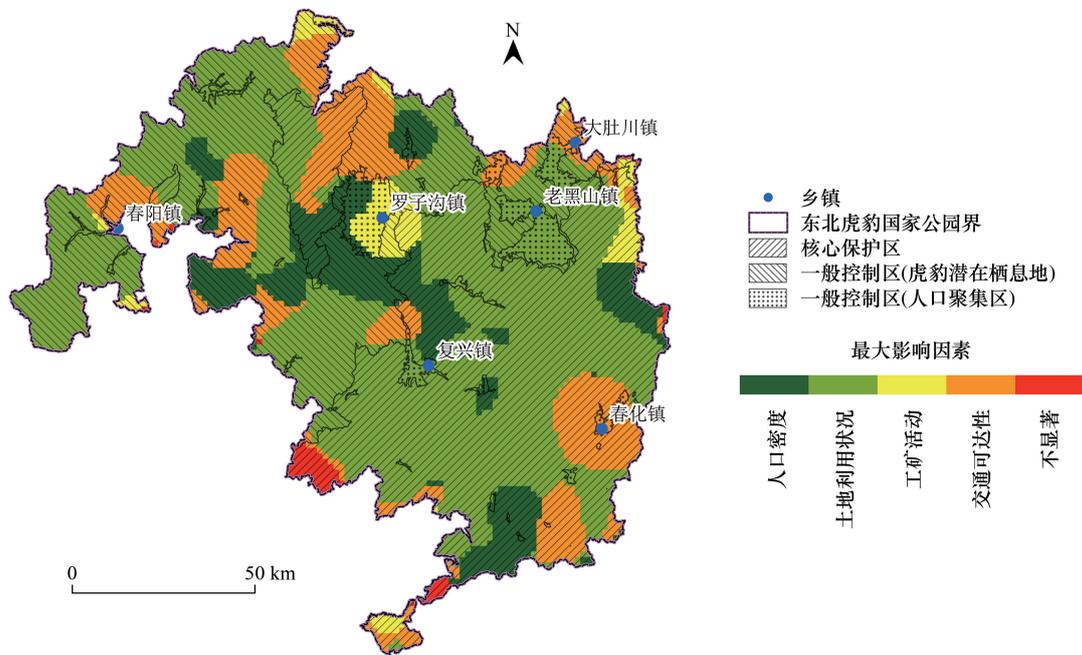


图9 LFCI 最大影响因素空间分布

Fig.9 Spatial distribution of the most influential factors of LFCI

总体来看,虎豹公园内景观破碎化程度较轻,尤其是核心保护区和虎豹潜在栖息地,主要是由于园区内以森林覆盖为主,斑块较为完整,但人类的过度开发活动导致部分地区景观破碎化严重,且存在从人口聚集区向虎豹潜在栖息地和核心保护区扩散的趋势,严重阻碍东北虎豹的生存繁衍和自由迁徙。本文通过分析各人类足迹指标与虎豹公园及其管控分区景观破碎化的空间关系,在一定程度上揭示了各人类足迹指标对虎豹公园景观破碎化影响程度的空间差异性,同时充分证明了人类的过度开发活动是虎豹公园景观破碎化加剧的重要驱动因素之一,对生态廊道建设工程存在巨大威胁。其一,随着近代以来人口的不断流入,各种规模的林场、牧场、耕地、园地以及大量用于人类生产生活的建设用地散布其中,导致森林破碎化严重,园区内落后的生产生活方式至今仍未发生改变,极大地威胁着东北虎豹栖息地的稳定以及种群数量的发展;其二,由于经济发展和国防建设需要,虎豹公园内由各等级道路组成的交通路网交错纵横,总长度达 5000 余公里,特别是边境公路国道 G331 贯穿公园东部,过往车辆和潜在较高的交通可达性在一定程度上阻隔了中俄边境地区的虎豹种群向内陆迁徙的通道;其三,虎豹公园内人口相对较多且分散,其中 500 人以上的村屯有 38 个,其他规模较小的林场和农场人口则分散于其他地区,此外还有 31 个边境村屯分布于中俄、中朝边境线附近,较为分散的人口分布对虎豹栖息地破碎化影响巨大;其四,工矿活动作为虎豹公园内传统的生产方式,是当地居民主要的经济来源,然而工矿用地的过度开发对地表破坏严重,是虎豹栖息地景观破碎化加剧的重要影响因素。

综上所述,为保护东北虎豹种群资源及其所在的自然生态系统,亟待对虎豹公园内的人类活动进行合理管控,公园管理部门应当遵循东北虎豹种群可持续生存与发展的保护生态学规律,优先清理园区内不符合保护和规划要求的各类人工设施,对已有交通道路实行车辆通行管控,严格控制人口增量,逐渐减少农业生产、矿产开发等活动,最终实现人与虎豹的和谐共存。

此外,本文仍存在不足之处。首先,尽管本文在局部 1500m 格网尺度上分析了人类活动对虎豹公园内景观破碎化的影响,但仍需进一步把人类活动落到更加精细的空间位置上,因此,在未来的研究中将通过大数据等手段来细化人类活动的表达和空间定位;其次,本文仅分析了各人类足迹指标与景观破碎化之间的空间关系,并未深入探讨人类足迹对景观破碎化影响的阈值效应,即人类活动对自然生态系统产生风险的阈值。因

此,这也将是未来重要的研究方向之一,旨在为国家公园的规划和发展提供更加直观的数据支持。

4.2 结论

本文通过构建适地化的人类足迹指标体系,并借助景观格局分析、回归分析、GIS 空间分析等方法,从全局和局部两个尺度上探讨各人类足迹指标对虎豹公园及其管控分区景观破碎化的影响及其空间分异特征。研究结果表明:

(1)从景观破碎化空间分布来看,虎豹公园内景观破碎化程度以低、较低为主,但高度和较高破碎化区域仍占据公园全域面积的 8.96%。其中在核心保护区占比为 4.08%,主要分布于东南部,呈条带状分布;在虎豹潜在栖息地占比为 5.09%,主要分布于该区域内人类居住点周围,呈点状分布;而在人口聚集区中的占比则高达 60.54%,且以乡镇驻地为中心向外围扩散。

(2)从公园全域范围来看,对景观破碎化的影响从高到低依次为土地利用状况(0.332)、交通可达性(0.289)、人口密度(0.224)、工矿活动(0.148),而夜间灯光与景观破碎化的相关性不显著。

(3)从各管控分区来看,核心保护区与虎豹潜在栖息地内各人类足迹指标对景观破碎化的影响规律与全局一致,而在人口聚集区中,工矿活动成为该区域中第二影响因素。

(4)从各人类足迹指标主导的空间格局来看,土地利用状况对景观破碎化的影响区域最为广泛,涵盖了园区的大部分地区;交通可达性的影响区域集中分布于春化镇、大肚川镇、春阳镇周边地区及公园北部地区;人口密度的影响区域主要以罗子沟镇、复兴镇附近地区为主,此外在东部边境地区、核心保护区南部及其他小型居民点周围也有分布;工矿活动的影响区域最小,主要分布在工矿业较为集中的罗子沟镇及周边地区,且对核心保护区东北部地区也存在一定影响。

参考文献(References):

- [1] 何思源, 苏杨. 原真性、完整性、连通性、协调性概念在中国国家公园建设中的体现. 环境保护, 2019, 47(3/4): 28-34.
- [2] 唐芳林, 闫颜, 刘文国. 我国国家公园体制建设进展. 生物多样性, 2019, 27(2): 123-127.
- [3] 姜坤, 戴文远, 胡秋凤, 欧慧, 黄康. 基于移动窗口法的海岛型城市景观破碎化及其驱动机制分析——以福建省平潭岛为例. 生态科学, 2019, 38(4): 99-110.
- [4] 张金茜, 巩杰, 马学成, 柳冬青. 基于 GeoDA 的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1476-1483.
- [5] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [6] 张明莎, 刘乾飞, 王敬文, 蔡颖, 柏智刚, 叶江霞. 1992—2018 年轿子山自然保护区人为活动遥感监测. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1097-1105.
- [7] 孙永光, 赵冬至, 吴涛, 卫宝泉, 高树刚, 李媛, 曹芳芳. 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例. 生态学报, 2012, 32(12): 3645-3655.
- [8] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. 地理学报, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [9] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. BioScience, 2002, 52(10): 891-904.
- [10] Woolmer G, Trombulak S C, Ray J C, Doran P J, Anderson M G, Baldwin R F, Morgan A, Sanderson E W. Rescaling the human footprint: a tool for conservation planning at an ecoregional scale. Landscape and Urban Planning, 2008, 87(1): 42-53.
- [11] Carver S, Comber A, Memorrán R, Nutter S. A GIS model for mapping spatial patterns and distribution of wild land in Scotland. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(3/4): 395-409.
- [12] Tapia-Armijos M F, Homeier J, Munt D D. Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador: influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas. Applied Geography, 2017, 78: 22-32.
- [13] Yin L, Dai E F, Zheng D, Wang Y H, Ma L, Tong M. Spatio-temporal analysis of the human footprint in the Hengduan Mountain region: assessing the effectiveness of nature reserves in reducing human impacts. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(7): 1140-1154.
- [14] Li S C, Wu J S, Gong J, Li S W. Human footprint in Tibet: assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. Science of the Total Environment, 2018, 621: 18-29.
- [15] 高誉珈, 原友蘭, 翁奕城. 基于人类足迹(HF)理论的台湾日月潭风景区人类活动影响评估. 广东园林, 2019, 41(6): 31-36.

- [16] 王宪礼, 布仁仓, 胡远满, 肖笃宁. 辽河三角洲湿地的景观破碎化分析. 应用生态学报, 1996, 7(3): 299-304.
- [17] 梁兵宽, 刘洋, 唐小平, 班勇, 蒋亚芳, 孔颖, 李兵兵, 白玲. 东北虎豹国家公园规划研究. 林业资源管理, 2020, (6): 23-30.
- [18] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 白天骄. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化. 生态学报, 2020, 40(6): 1910-1922.
- [19] 曹巍, 黄麟, 肖桐, 吴丹. 人类活动对中国国家级自然保护区生态系统的影响. 生态学报, 2019, 39(4): 1338-1350.
- [20] 陈雅如, 韩俊魁, 秦岭南, 杨怀超. 东北虎豹国家公园体制试点面临的问题与发展路径研究. 环境保护, 2019, 47(14): 61-65.
- [21] Luck G W, Daily G C, Ehrlich P R. Population diversity and ecosystem services. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(7): 331-336.
- [22] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 欧阳志云. 1990—2010年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [23] 宁静, 张树文, 王蕾, 匡文慧. 资源型城镇土地退化时空特征分析——以黑龙江省大庆市为例. 资源科学, 2007, 29(4): 77-84.
- [24] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Beher J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. Nature Communications, 2016, 7(1): 12558.
- [25] 王娟, 崔保山, 刘世梁, 刘杰, 翟红娟. 各等级道路网对纵向岭谷区景观结构健康的影响. 环境科学学报, 2008, 28(2): 261-268.
- [26] Nordhaus W, Chen X. A sharper image? Estimates of the precision of nighttime lights as a proxy for economic statistics. Journal of Economic Geography, 2015, 15(1): 217-246.
- [27] 段群滔, 罗立辉. 1990—2015年青藏高原人类足迹数据集. 中国科学数据, 2020, 5(3): 303-312.
- [28] 潘菲, 吉长东. 基于 InVEST 模型的泉州市生态环境质量生态系统服务功能时空变化分析. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(10): 141-144.
- [29] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 郭蒙, 靳英华, 高雪娇. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究. 生态科学, 2018, 37(6): 139-147.
- [30] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000: 99-110.
- [31] 许莹莹, 李薇, 王振龙, 吕海深, 范月, 王兵, 王怡宁. 基于主成分分析的裸地潜水蒸发与气象要素关系模拟. 水文, 2020, 40(4): 7-13, 39-39.
- [32] 马建章. 遵循自然生态规律 加强东北虎豹保护. 国土绿化, 2019, (1): 14-17.