

# 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响

李广东<sup>1,2</sup>, 戚伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 探索建设用地扩张对景观格局变化的影响机理是理解人类活动对生态系统功能、格局和过程变化影响机制的关键。但中国全国尺度建设用地扩张过程对景观格局演化的影响研究明显不足。基于此, 突破传统行政区划单元的分析方法, 以覆盖全国的10 km 格网为基本单元, 基于1975-2014年建成区比率数据来表征建设用地扩张水平, 运用同期土地利用数据计算相应的景观指数, 定量刻画了建设用地扩张及景观格局的时空演化过程, 并运用空间计量经济模型定量解析了建设用地扩张过程对景观格局演化的影响效应。同时, 基于全样本、不同时间点、不同规模城市 and 不同区域城市的对比揭示建设用地扩张过程对景观格局演化影响的时空差异性。研究结果表明: 40年间建成区比率值增长了3倍, 高于同期的人口城镇化增长水平, 东、中 and 西部间呈现出显著的梯度差异性, 而且差异程度逐步增加, 大、中、小城市之间的差异也较为显著。1975-1990年、1990-2000年和2000-2014年3个时间段的年均增速分别为5.87%、2.32% and 2.32%。景观格局总体上也经历了显著变化, 优势景观类型的主导性逐步降低, 景观格局趋于破碎化, 复杂度增强, 邻近度趋于离散, 聚集度逐步降低, 结合度渐高, 景观多样性和均匀度均有所提高。随着建设用地扩张水平的提高, 景观越来越趋于破碎化, 人类活动对景观的干扰强度和频率也不断增强。例如, 建设用地扩张水平每提高1%将导致景观斑块数量提高0.45%左右。但是建设用地扩张水平与景观复杂度的变化在空间上存在错位。建设用地扩张水平的提高在一定程度上使同类型斑块间的距离变近, 景观聚集度出现降低趋势, 景观越来越呈现多种要素的密集格局, 斑块聚合和集群性增强, 相应的结合度也越来越高, 景观均衡化趋势和均匀分布越来越明显。同时发现, 不同规模城市 and 不同区域的影响差异显著, 除地理区位因素差异性不显著外, 其他控制要素也对景观格局演化具有差别化的影响。

**关键词:** 建设用地扩张; 景观格局; 影响机制; 空间计量模型; 时空异质性; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201912011

## 1 引言

经过40年的快速城镇化, 中国城镇化率从1978年的17.92%增至2017年的58.52%<sup>[1]</sup>, 其城镇化发展进程成为人类历史上社会经济发展的奇迹之一。中国的快速城镇化在满足人民生活需求、推动工业化、实现经济社会转型发展等方面做出了突出贡献。但同时由于城镇化的粗放无序发展, 导致建设用地急剧扩张, 带了一系列的生态环境问题<sup>[2-3]</sup>。其中, 建设用地扩张对生态景观的侵占与破坏、对景观格局的改变是最为显著的影响之一<sup>[4]</sup>。因此, 定量刻画建设用地扩张对景观格局的影响逐渐受到国内外学者的广泛关注。

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41590842, 41971207) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41590842, No.41971207]

作者简介: 李广东(1986-), 男, 山东临沂人, 副研究员, 主要从事城市地理、城镇化与生态环境耦合关系研究。

E-mail: ligd@igsnrr.ac.cn

景观格局一般指景观的空间格局 (Spatial Pattern), 是大小、形状、属性不一的景观空间组件在空间上的分布、结构与配置规律<sup>[5]</sup>。景观格局演化是土地利用/覆盖变化和景观异质性在时空上的直接表现。景观格局通常通过一系列的面积、形态、集聚和多样化指标来量化和表征, 其中整合在Fragstats软件内的景观指数是刻画、评估、监测和管理景观格局时空变化最为常用的工具<sup>[6]</sup>。同时, 各种景观指数也用于量化分析景观空间格局和与之相关的生态学过程。

目前大量研究探索了景观格局与建设用地扩张以及城镇化的关系, 其中遥感数据或土地利用数据与景观指数方法的结合是最常用的方法, 同时城乡梯度分析和空间计量模型的结合也逐步成为主流。基于此, 学者们探讨了二者的关系。例如, Weng发现土地利用多样化和景观破碎化程度与城市化程度显著正相关<sup>[7]</sup>。Deng等整合遥感数据与景观指数方法以杭州市为案例发现快速城镇化导致了景观格局的根本性变化, 景观格局经历了从农业土地利用主导型景观模式到城市土地利用主导型景观模式的转变<sup>[8]</sup>。Yeh等发现景观多样化指数与建设用地扩张程度并不是简单的线性关系而是倒“U”型关系<sup>[9]</sup>。Buyantuyev等发现建设用地扩张进程导致了景观的破碎化和复杂化, 但多数个体斑块在形态上是更为紧凑的<sup>[10]</sup>。Su等以杭嘉湖地区为案例研究发现, 城镇化导致了农业景观格局的侵占、破碎化和分离化<sup>[11]</sup>, 同时该地区的城镇化也导致了除森林和湿地保护区外, 其他生态区景观的多样化、不规则性、破碎化和分离性的提高<sup>[12]</sup>。Zhou等以昆明市为案例发现, 城市蔓延导致了对绿地景观的占用, 同时也引发了整体景观的破碎化, 尤其在城市外围地区<sup>[13]</sup>。Li等以北京市为例, 发现不同的建设用地扩张模式对景观格局的影响是显著不同的<sup>[14]</sup>。

从上述的研究进展可知, 多数相关研究均聚焦在单个城市尺度, 最多在生态区尺度, 全国尺度的相关研究仍未可见。但是单个城市或者单个区域的研究发现无法推演出全国宏观尺度的整体状况, 从而也无法为全国不同区域和不同规模城市的宏观决策提供支撑。因此, 很有必要从全国宏观尺度开展研究探索建设用地扩张对景观格局演化的影响。在基本分析单元选择上, 多数研究仍是基于行政区划或者生态区为主, 基于格网单元的相关研究仍不多见。基于行政区域的相关研究虽然有助于获取社会经济数据, 但是也牺牲了对其内部异质性的考察, 而这种异质性对景观格局分析至关重要。虽然在分析方法上空间效应逐步受到学者们的重视, 但是空间计量模型的应用仍不多见。

鉴于此, 本文将以全国尺度为研究基点, 整合建设用地扩张数据、土地利用数据和其他自然地理数据, 运用地理空间分析方法和景观指数方法定量刻画建设用地扩张以及景观格局的时空演化过程, 并运用空间计量经济模型以10 km格网为基本单元定量解析1975-2014年建设用地扩张过程对景观格局演化的影响。深化对全国尺度建设用地扩张和景观格局变化及其差别化影响机制的理解, 总结其中的影响规律。同时, 从全样本、不同规模城市 and 不同区域城市的对比的视角解析建设用地扩张过程对景观格局演化影响的异质性, 诊断问题区域, 为决策者在城镇化与景观格局变化交互关系的相关决策方面提供参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 建设用地扩张过程的量化

建设用地变化是人类主导的土地利用变化过程最为核心的表现, 但是数据的精度和时间可比性一直是困扰建设用地变化研究的难点。目前全球较为常用的建设用地数据集

包括 Global Land Cover 2000<sup>[15]</sup>、GlobCover v2<sup>[16]</sup>、MODIS 500 m Map of Global Urban Extent<sup>[17]</sup>、Global Rural- Urban Mapping Project<sup>[18]</sup>、DMSP- OLS Nighttime Lights<sup>[19]</sup>、Landscan<sup>[20]</sup>以及 Global Urban Footprint<sup>[21]</sup>等。但是由于对人类聚居地定义的差异以及数据分辨率一般较粗（多数为 1 km），加之数据在多时间点的可比性上往往存在问题，已有数据并不适合进行多时间点的建设用地演化过程分析。而 2016 年欧盟合作研究中心（European Commission Joint Research Centre）发布的全球人类聚居地图层数据（GHSL-Global Human Settlement Layer）为量化全球不同尺度建设用地演化过程提供了更好的选择<sup>[22]</sup>。该数据集较为综合地展示了全球地表人类聚居地过去 40 年（1975 年、1990 年、2000 年和 2014 年）的演化过程。该数据集具有良好的时间可比性，同时拥有覆盖全球的 38 m 分辨率，适合进行全球多尺度数据对比分析。该数据集运用的遥感影像数据是 Landsat 影像（包含 GLS1975、GLS1990、GLS2000 以及 ad-hoc Landsat 8 collection 2013/2014）。经过目视解译核对数据精度，发现全球不同区域的平均准确度为 80%~90% 之间<sup>[23]</sup>，具有较高的准确度，可以运用到中国全国宏观尺度研究中。为表征中国建设用地扩张过程，这里选用了该数据集中的 250 m 分辨率建成区栅格数据（GHS BUILT-UP GRID, LDS，该数据将单位面积内建成区的比率表示为 0~1 之间的值）。

## 2.2 景观格局的量化

目前景观格局的量化主要借助于景观指数方法，但是目前的景观指数数量较多，有些指数甚至是高度相关的，因此选择合适的景观指数决定了景观格局演化分析的科学性。景观格局指数按照尺度可以划分为斑块尺度、类型尺度和景观尺度 3 个尺度级别。为了有效量化每个 10 km×10 km 格网内景观的整体特征，本文选择了景观尺度的景观指数进行景观格局演化过程分析。同时，为了实现对景观格局的全面分析，从景观格局的面积边缘、密度大小及差异、形态复杂度、邻近度、聚散性和多样性 6 个方面选择了 12 个较为常用的景观指数来量化其演化过程。具体的景观指数、计算公式和具体含义如表 1 所示。

景观格局分析用到的基础数据是全国尺度 20 世纪 70 年代末期、20 世纪 80 年代末期、2000 年和 2015 年 1 km 分辨率的土地利用数据。该数据集与上述的全球人类聚居地图层数据在时间上相匹配，数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn/>）。该数据集生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源，通过人工目视解译生成，包括耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型。为了减少数据计算量选用了土地利用的一级分类体系。

本文选用格网作为景观格局分析的基础单元，同时考虑到计算量的限制以及数据精度的匹配性，通过实验选择全国 10 km 格网作为基本单元。将上述的人类聚居地图层数据与土地利用数据相匹配。运用 Fragstats v4.2.1 软件<sup>[6]</sup>的 Moving Window 功能进行景观指数计算（以 10 km 为基础单元），最终分别获取 20 世纪 70 年代末期、20 世纪 80 年代末期、2000 年和 2015 年 4 期全国尺度 26799 个、33574 个、36566 个和 40698 个格网单元的 12 个景观指数值。

## 2.3 建设用地扩张过程对景观格局演化影响的分析模型

根据已有文献，建设用地扩张过程对景观格局演化的影响分析主要借助回归分析方法。其中，单个时间点的横截面数据模型和多个时间点的面板数据模型均有相关研究。同时，考虑到潜在的空间自相关性，选择空间计量经济模型是近些年来的研究共识之一。本文选用建成区比率来表征建设用地扩张程度，将其作为模型的自变量之一，将计算获取的景观指数值分别作为因变量。

表1 景观指数解释表

Tab. 1 Interpretation table for landscape metrics

分类	指数	公式
面积边缘指数	最大斑块所占景观面积的比例(LPI)	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$ $a_{ij}$ 为斑块 <i>ij</i> 的面积; <i>A</i> 为景观总面积。
	边缘密度(ED)	$ED = \frac{E}{A}(10,000)$ $E$ 为景观内的斑块的边缘总长度; <i>A</i> 为景观总面积。
密度大小及差异指数	斑块数量(NP)	$NP = N$ $N$ 为景观内斑块数量。
	平均斑块面积(MPS)	$MPS = A/NP$ $A$ 等于总景观面积; <i>NP</i> 为景观内斑块数量。
形态复杂度指数	面积加权平均形状指数(AWMSI)	$AWMSI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{0.25P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left( \frac{a_{ij}}{A} \right) \right]$ $P_{ij}$ 为斑块周长; $a_{ij}$ 为斑块面积; <i>A</i> 为斑块总面积。
	面积加权平均斑块分形指数(AWMPFD)	$AWMPFD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{2 \ln(0.25P_{ij})}{\ln(\sqrt{a_{ij}})} \right) \left( \frac{a_{ij}}{A} \right) \right]$ $P_{ij}$ 为斑块周长; $a_{ij}$ 为斑块面积; <i>A</i> 为斑块总面积。
		总面积。
邻近度指数	平均邻近度(PROX_MN)	$PROX\_MN = \sum_{g=1}^n \frac{a_{ig}}{h_{ig}^2}$ $a_{ig}$ 为斑块 <i>ijg</i> 与斑块 <i>ij</i> 的相邻面积; $h_{ig}$ 为斑块 <i>ijg</i> 与斑块 <i>ij</i> 间的距离。
	欧氏平均最邻近距离(ENN_MN)	$ENN\_MN = \sum_{j=1}^n (h_{ij}/n_i)$ $h_{ij}$ 等于离斑块 <i>ij</i> 最近的同类型邻居斑块的距离; $n_i$ 为斑块总数量。
聚散性指数	聚集度指数(CONTAG)	$CONTAG = \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m [(p_i) \times (g_k / \sum_{k=1}^m g_k)] [\ln(p_i) \times (g_k / \sum_{k=1}^m g_k)]}{2 \ln(m)} \right] \times 100$ $p_i$ 为斑块类型占景观的比例; $g_k$ 为斑块类型 <i>i</i> 和 <i>k</i> 临接数量; <i>m</i> 为景观内斑块数量。
	结合度指数(COHESION)	$COHESION = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \times \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right] \times 100$ $P_{ij}^*$ 为斑块周长(元胞计数); $a_{ij}^*$ 为斑块面积(元胞计数); <i>Z</i> 为景观中的元胞数量。
多样性指数	香农多样性指数(SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)$ $P_i$ 为类型 <i>i</i> 斑块占景观内斑块的比例。
	香农均度指数(SHEI)	$SHEI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) / \ln m$ $P_i$ 为类型 <i>i</i> 斑块占景观内斑块的比例; <i>m</i> 为斑块数量。

注：具体计算公式的含义请参考Fragstats v4.2.1帮助文件。

同时，为控制其他变量的影响，选择了4个较为常用的控制变量，分别为海拔高度（DEM，单位为km）、坡度（Slope，单位为°）、到最近地级城市距离（Dis\_city，单位为km）和到最近县城距离（Dis\_county，单位为km）（图1）。其中，海拔高度和坡度用于表征自然环境对景观格局变化的影响，也可以表征景观格局变化的难度。到最近地级城市距离和到最近县城距离用来表征景观所在的宏观和微观区位条件差异。

相比横截面数据模型，面板数据模型往往可以更好地控制个体异质性，容易避免多重共线性问题，具有更大的自由度和更高的效率。这里选用空间滞后模型（SAR）和空间误差模型（SEM），一般有联合OLS、空间固定效应模型、时间固定效应模型以及时空固定效应模型4种模型可供选择。假设二者的数据在时间上是可比的，建设用地扩张对景观格局的影响往往并不存在时间滞后性。需要特殊说明的是由于本文中选用的控制变量数据是不变的，因此仅可以选用联合OLS和时间固定效应模型。SAR模型的基本假设是：一个特定格网的景观格局指数变化受与其空间邻近的格网景观格局指数变化的影



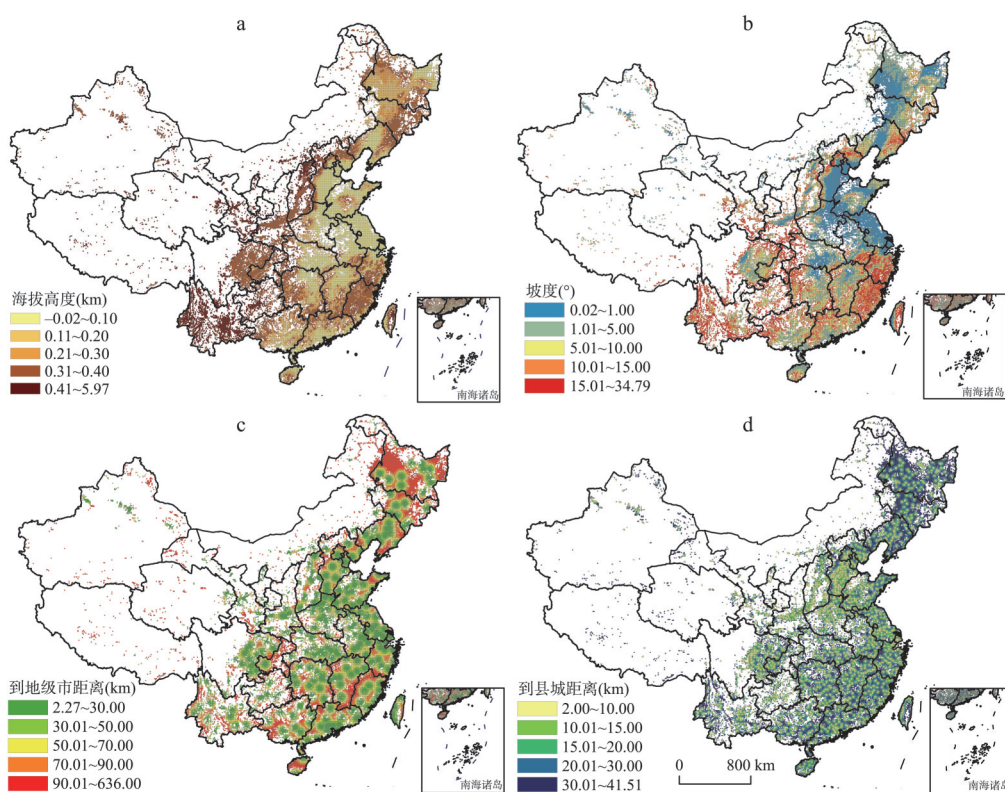


图1 影响中国景观格局变化的控制变量空间分布图(2015年)

Fig. 1 Spatial distribution of control variable for influencing landscape pattern changes in China (2015)

响。SEM模型的基本假设是：一个特定格网的景观格局指数变化受模型中被遗漏变量（景观格局指数其他影响因素）是空间相关的，即模型中不可观测到的误差项在空间上是相关的。

空间滞后面板模型可以设定为：

$$y_{it} = \delta \sum_{j=1}^N W_{ij} y_{jt} + x_{it} \beta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中： $i$ 为横截面维度（格网单元）， $i=1, 2, \dots, N$ ； $t$ 为时间维度（时间段，本文为4）； $y_{it}$ 为因变量指不同格网不同年份的景观指数值； $W_{ij}$ 为空间权重矩阵 $W$ 的要素； $x_{it}$ 为外生解释变量； $\mu_i = (\mu_1, \dots, \mu_N)^T$ 为空间特定效应； $\varepsilon_{it}$ 为误差项。

空间误差面板模型可以设定为：

$$y_{it} = x_{it} \beta + \mu_i + u_{it}, \quad u_{it} = \lambda \sum_{j=1}^N w_{ij} u_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中： $u_{it}$ 为空间自相关误差项。

选择SAR模型还是SEM模型来描述具体空间数据是模型选择的重点。本文选用最为常用的LM（Lagrange Multiplier）检验<sup>[24]</sup>和稳健LM检验<sup>[25]</sup>来判定最优模型的选择。具体通过对比空间滞后项的LM检验统计值、稳健LM检验统计值、空间误差自相关的LM检验统计值和稳健LM检验统计值的显著性和大小来判定合适的模型。

此外，为了考察不同城市规模和不同区域建设用地扩张演化过程对景观格局的影响，同时进行了内部的差异性分析。按照2010年人口普查数据将样点区的所有城市按照

大城市、中等城市、小城市进行划分(按照《关于调整城市规模划分标准的通知》中提出的城市划分标准,将城区常住人口50万以下的城市识别为小城市,城区常住人口50万以上100万以下的城市识别为中等城市,城区常住人口100万以上的识别为大城市)。同时,将所有样点按照地域差异划分为东、中、西地区<sup>①</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 中国建设用地扩张的时空演化过程

从建设用地扩张的时间变化来看,以10 km为基本格网单元内建成区的平均值计算,1975年、1990年、2000年和2014年建成区的比率分别为0.0094、0.0221、0.0278和0.0383,全国所有样点40年间建成区比率值增长了3倍,高于同期的人口城镇化增长水平(1975-2014年全国人口城镇化水平增长了2.16倍)。1975-1990年、1990-2000年和2000-2014年3个时间段的年均增速分别为5.87%、2.32%和2.32%。从图2a显示的散点矩阵图可以看出,1975-2014年建成区比率的可比性较强( $R^2$ 均大于0.75),同时发现绝大多数样点均处于45度的斜率线之上,说明绝大多数样点的建成区比率均是增长的(1975-2014年仅有576个格网出现降低趋势,仅占到1.95%)。同时,从城市规模和区域差异来看,建设用地扩张的内部差异十分显著。从图2b可以看出,建设用地扩张在东部、中部和西部间呈现出显著的梯度差异性,而且不同区域的差异程度逐步增加。同时发现大城市、中等城市和小城市之间的差异也较为显著,而且差异度也呈逐步增大的趋势。但是以不同规模城市和区域内部的变异系数(表征差异性,通过样本标准差除以样本平均值计算)来看,却发现不论是大、中、小城市内部还是东、中、西不同区域内部的差异性均逐步减小。

在空间格局上1975-2014年中国的建设用地扩张过程同样经历了显著变化。由图3和图4可知,中国的建设用地扩张过程从单个城市为中心逐步扩展开来,逐步形成区域建设用地扩张的发展趋势。1975年重点建设用地扩张地区主要集中在东部沿海地区的北京、上海、广州、汕头、福州、青岛、大连以及台湾西部的台北、台中和高雄等主要城市;同时,中西部地区的省会城市也是建设用地扩张的重点地区。随着改革开放的不断推进,到1990年重点建设用地扩张地区逐步扩大,建设用地扩张逐步扩展到周边地区,形成区域建设用地扩张发展的雏形,例如在京津冀地区形成了明显的建设用地扩张热点连片区,在长三角地区形成了“Z”字型建设用地扩张热点连片区,在珠三角地区形成了倒“U”型建设用地扩张热点连片区。到2000年重点建设用地扩张地区进一步扩张,热点区域也进一步扩大,除东部三大重点城市群地区外,山东半岛、浙江、福建和广东的沿海地区也形成了显著的区域性建设用地扩张热点区。到2014年,建设用地扩张地区进一步深化,整体建设用地扩张区域进一步扩大,但是热点区域与2000年相比并未发生大的变化。从北到南,哈大长和辽中南两大城市群形成东北地区的建设用地扩张核心区,京津冀、山东半岛、鲁南和豫北地区形成中国建设用地扩张面积最大的区域,长三角城市群形成了更为深入的建设用地扩张区域连片发展格局,浙东南、闽东以及粤东地区的建设用地扩张也逐渐形成了海峡西岸建设用地扩张的连片发展格局,珠三角建设用地扩张区域进一步扩张。

<sup>①</sup> 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南11个省(市);中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南8个省;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆12个省(市、自治区)。

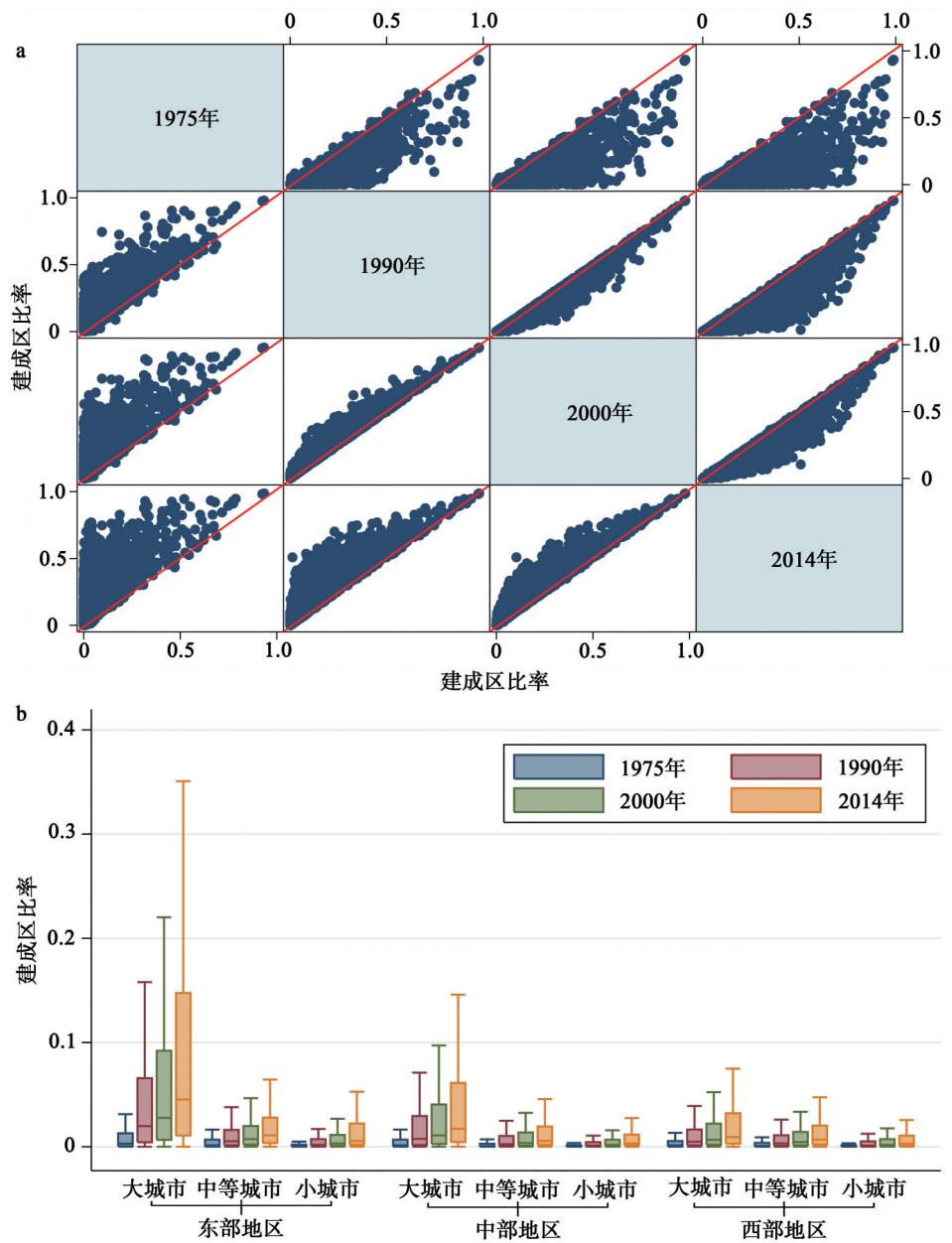


图2 1975-2014年中国建设用地扩张年际变化图

Fig. 2 Annual variation of built-up area ratio in China from 1975 to 2014

### 3.2 中国景观格局演化过程

由于人类活动的加剧,过去40年中国的景观格局也经历了显著变化(图5)。从面积边缘指数看,最大斑块所占景观面积的比例(LPI)呈现减小的趋势,1975-2000年间处于略有减少阶段,2000-2015年间减少的较为显著。LPI的减少说明景观内优势景观类型的主导性逐步降低,同时预示着景观中的优势种将逐步降低,但其内部种的丰度将会有所提高。这表明人类活动对景观的干扰强度和频率不断增强。从景观的边缘性来看,1975-2015年景观边缘密度(ED)不断增大,说明单位面积内的边缘长度不断增大,反



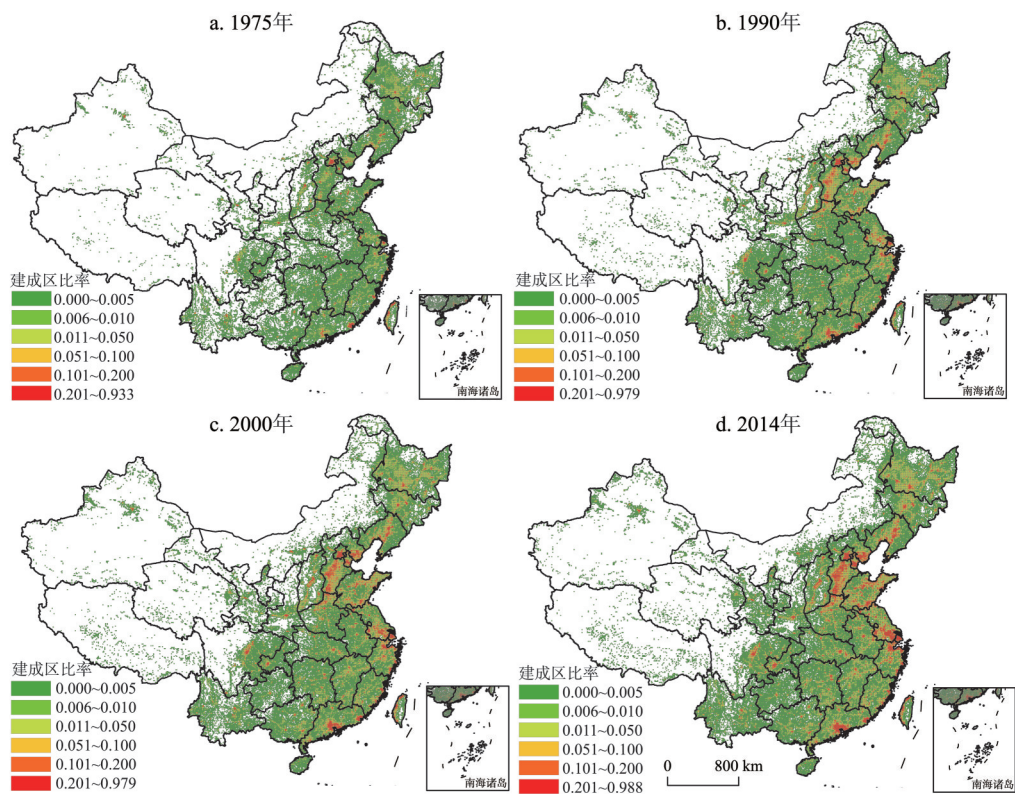


图3 1975-2014年中国建成区比率空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of built-up area ratio in China from 1975 to 2014

映出景观格局趋于破碎化的趋势，导致生境的破碎化。相反，边缘密度的增大可能会影响到边缘效应，而边缘效应对于生物多样性的研究和保护具有特定的价值，在某些特定的生境中边缘密度的提高将期望有高的生物多样性。

从景观的密度大小及差异指数看，1975-2015年斑块数量(NP)逐渐增多，表明景观的破碎度可能增强。通过平均斑块面积(MPS)指数进一步印证了上述判断，1975-2015年间景观内部的斑块平均规模变得越来越小，表明破碎化的小斑块越来越多，斑块的紧凑度(此处的紧凑仅表示与破碎化相反的含义，并不是基于复杂度的形态判断，下同)越来越差。二者的相互印证反映景观中各类斑块的集聚程度降低，破碎化程度逐渐增强。

从形态复杂度指数看，1975-2015年面积加权平均形状指数(AWMSI)先减后增，1990年之后景观空间格局的复杂度逐步增强，景观内的斑块变得越来越不规则。同时，边缘效应也逐步增强，可能会对动物的迁移、觅食等活动产生影响，同时影响植物的种植与生产效率。以分维理论来测量景观空间形状复杂性的面积加权平均斑块分形指数(AWMPFD)也经历了类似的变化趋势，但是其变化的相对幅度并不大。如果按照 $AWMPFD = 1$ 代表形状最简单的正方形或圆形， $AWMPFD = 2$ 代表周长最复杂的斑块类型来表征，本文中的值在1.074~1.076之间，也远未达到1.5的上限。因此，可以说1990年之后整体的景观复杂度是增强的，但是增强的幅度并不显著。

从景观邻近度指数看，1975-2015年平均邻近度(PROX\_MN)指数逐步增大，说明同类型斑块的邻近性越来越紧密和连续，该指数的提高对斑块间生物种迁徙或其它生态



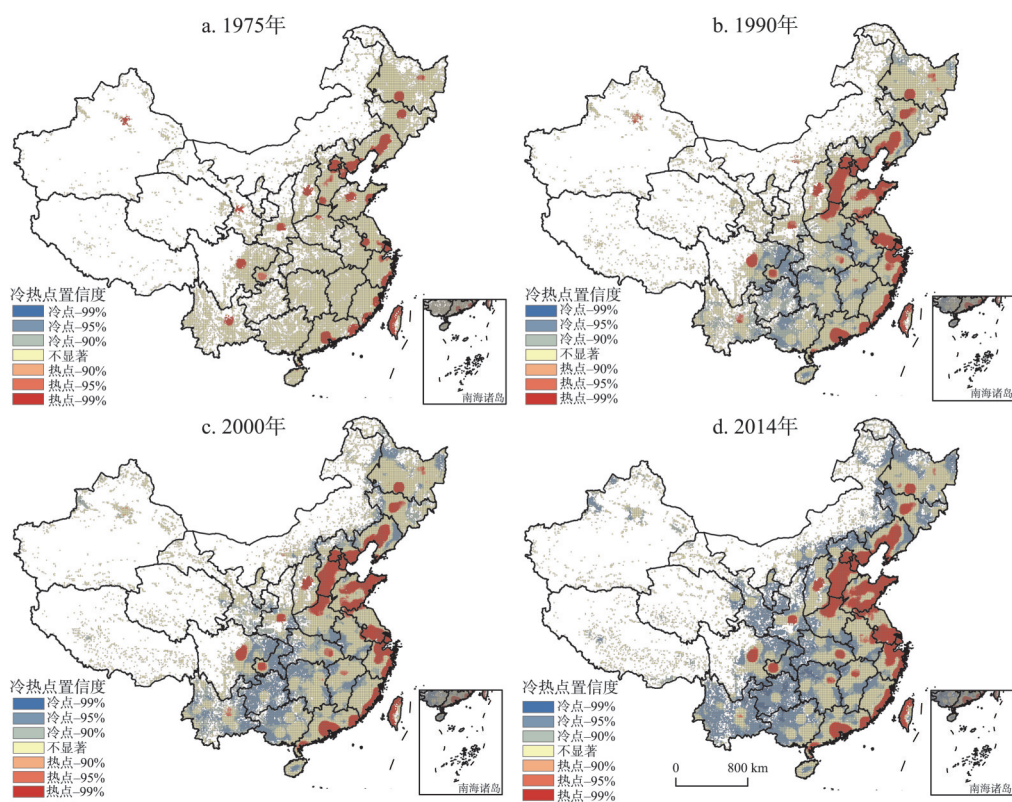


图4 1975-2014年中国建成区比率热点区识别

Fig. 4 Identification of hotspots for built-up area ratio in China from 1975 to 2014

过程进展的顺利程度都有十分重要的影响。但是欧氏平均最邻近距离 (ENN\_MN) 指数先减后增, 1990年之后不断增大, 表明1990年之后同类型斑块间相隔距离逐渐变远, 分布也较离散。PROX\_MN指数与ENN\_MN指数的结果出现明显的不一致情况。通过分析发现PROX\_MN指数对斑块规模较为敏感, 往往大的斑块面积具有低值的邻近度, 而小的斑块面积具有高值的邻近度。因此, 可以判断PROX\_MN值的提高可能是由于平均斑块面积的减小导致的。相比而言, ENN\_MN的结果更可靠<sup>[26]</sup>。

从景观的聚散性指数看, 1975-2015年用于描述景观内不同斑块类型团聚程度或延展趋势的聚集度指数 (CONTAG) 逐步减小, 低聚集度说明景观中某种具有优势类型连接性的斑块数量在减少, 同时也表明景观是具有多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度较高, 景观中存在许多小斑块。结合度指数 (COHESION) 并未呈现显著的线性增长趋势, 在1975-2000年间该指数逐步增大, 说明景观内的斑块在空间分布上变得越来越聚合和集群, 相应的结合度也越来越高。但是, 在2000-2015年间该指数却出现显著的降低趋势, 相应的结合度明显降低。

从多样性指数看, 1975-2015年香农多样性指数 (SHDI) 逐步增大, 说明斑块类型增加或各斑块类型在景观中呈现均衡化趋势分布。其增大的原因在于景观内的土地利用类型越来越丰富, 破碎化程度越高, 其不定性的信息含量也越大。该指数的变化与生态学中的物种多样性有紧密的联系。香农均度指数 (SHEI) 同样经历了显著增加, 说明各斑块类型出现明显的均匀分布趋势, 对景观多样性具有显著的影响。同时也说明景观内的主导景观类型的主导型逐步降低, 主导或优势类型在景观中出现均匀分布趋势。

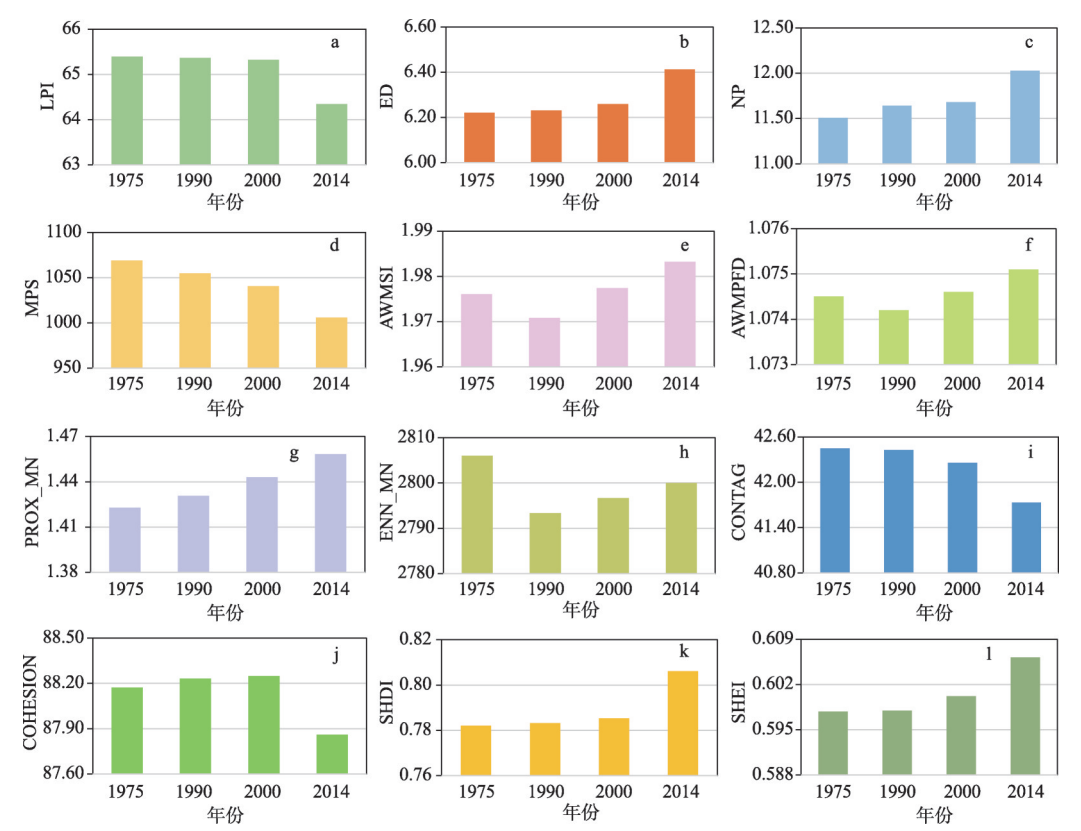


图5 1975-2014年中国景观格局指数变化图  
Fig. 5 Variations of landscape metrics in China from 1975 to 2014

3.3 中国建设用地扩张过程对景观格局演化的影响

为了综合考察建设用地扩张过程对景观格局演化的影响，本部分将从基于全样本分析、不同规模城市 and 不同区域的对比分析来揭示建设用地扩张过程对景观格局演化的影响以及城市之间和区域之间的差异性。基于12个景观指数值运用全局Moran's *I* 计算各自的空间自相关性，计算结果显示1975-2014年全样本单元各景观指数值的空间自相关系数均处于0.04~0.21之间 ( $P < 0.01$ )，说明存在显著的空间自相关性，如果仍然选用传统的回归分析方法可能出现偏误，因此需要选用空间计量经济模型。表2~表4展示了相应的计算结果。由于控制变量的数据不随时间变化，在面板数据模型中具有时间固定效应的空间面板数据模型是较优的模型。同时，根据LM空间滞后和LM空间误差检验以及稳健LM空间滞后和稳健LM空间误差检验来选择SAR模型还是SEM模型。

**3.3.1 面积边缘指数** 全样本回归结果显示，建设用地扩张与LPI指数显著负相关，表明随着建设用地的扩张，其侵占的生态用地和耕地等地类的面积越来越大，从而导致景观斑块类型的主导性降低并趋于破碎化，人类活动对景观的干扰强度和频率也不断增强。同时，结果显示海拔高度越高LPI值越低，说明在高海拔地区景观斑块类型的主导性降低的更快。从地形坡度来看，LPI值与坡度正相关，说明随着坡度的提高LPI值往往越高。这说明随着坡度的提高，人类活动对景观的影响趋于降低，景观斑块类型的主导性趋于提高。表征宏观区位条件的到地级城市最近距离和表征微观区位条件的到县城最近距离均与LPI值显著正相关，说明距离地级城市和县城越远的地区其LPI值越高，景观斑

表 2 全样本空间面板回归模型计算结果  
Tab. 2 Result of spatial panel regression for whole sample

因变量	Expansion	DEM	Slope	Dis_city	Dis_county	$\delta$ 或 $\lambda$	$R^2$	LM空间滞后	LM空间误差	稳健LM空间滞后	稳健LM空间误差	选取模型
LPI	-35.694 <sup>a</sup>	-0.0019 <sup>a</sup>	0.4248 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.7170 <sup>a</sup>	0.4370	74439.29 <sup>a</sup>	74680.49 <sup>a</sup>	124.15 <sup>a</sup>	365.35 <sup>a</sup>	SEM-TFE
ED	0.5650 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	0.0026 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.7460 <sup>a</sup>	0.5009	100450.35 <sup>a</sup>	99295.71 <sup>a</sup>	1155.18 <sup>a</sup>	0.54	SAR-TFE
NP	0.4538 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.1174 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	-0.0002 <sup>a</sup>	0.7130 <sup>a</sup>	0.4333	73644.32 <sup>a</sup>	73912.35 <sup>a</sup>	46.73 <sup>a</sup>	314.76 <sup>a</sup>	SEM-TFE
MPS	-88.3851 <sup>a</sup>	0.0267 <sup>a</sup>	1.2719 <sup>a</sup>	0.0004 <sup>a</sup>	0.0041 <sup>a</sup>	0.6260 <sup>a</sup>	0.3766	54604.60 <sup>a</sup>	54125.59 <sup>a</sup>	491.19 <sup>a</sup>	12.18 <sup>a</sup>	SAR-TFE
AWMSI	-0.1064 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.6100 <sup>a</sup>	0.3222	49524.11 <sup>a</sup>	48513.74 <sup>a</sup>	1280.89 <sup>a</sup>	270.51 <sup>a</sup>	SAR-TFE
AWMPFD	-0.0030 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	0.0003 <sup>a</sup>	0.6400 <sup>a</sup>	0.3510	55127.28 <sup>a</sup>	54078.46 <sup>a</sup>	1247.60 <sup>a</sup>	198.78 <sup>a</sup>	SAR-TFE
PROX_MN	0.7655 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0068 <sup>a</sup>	0.0004 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.5280 <sup>a</sup>	0.2234	27772.44 <sup>a</sup>	27240.46 <sup>a</sup>	711.02 <sup>a</sup>	179.03 <sup>a</sup>	SAR-TFE
ENN_MN	-417.5628 <sup>a</sup>	-0.0943 <sup>a</sup>	-3.4665 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	-0.0008 <sup>a</sup>	0.2300 <sup>a</sup>	0.0451	3080.09 <sup>a</sup>	3030.71 <sup>a</sup>	115.46 <sup>a</sup>	66.08 <sup>a</sup>	SAR-TFE
CONTAG	-18.6014 <sup>a</sup>	-0.0018 <sup>a</sup>	-0.0215 <sup>a</sup>	-0.0002 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	0.6380 <sup>a</sup>	0.3596	54960.28 <sup>a</sup>	54290.98 <sup>a</sup>	671.80 <sup>a</sup>	2.50	SAR-TFE
COHESION	-6.0098 <sup>a</sup>	-0.000 <sup>a</sup>	0.0075 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.7010 <sup>a</sup>	0.4275	78185.94 <sup>a</sup>	77967.15 <sup>a</sup>	322.13 <sup>a</sup>	103.34 <sup>a</sup>	SAR-TFE
SHDI	0.3091 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0017 <sup>a</sup>	0.0003 <sup>a</sup>	-0.0002 <sup>a</sup>	0.7440 <sup>a</sup>	0.4994	97540.60 <sup>a</sup>	95740.24 <sup>a</sup>	1827.14 <sup>a</sup>	26.78 <sup>a</sup>	SAR-TFE
SHEI	0.2104 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0000 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.6710 <sup>a</sup>	0.3928	63597.89 <sup>a</sup>	63570.92 <sup>a</sup>	246.65 <sup>a</sup>	219.69 <sup>a</sup>	SAR-TFE

注：SAR-TFE为时间固定效应空间自相关面板模型，SEM-TFE为时间固定效应空间误差面板模型。根据数据完整性，剔除数据缺失格网，最终样本量为26799。a为在1%的水平上显著；b为在5%的水平上显著；c为在10%的水平上显著。Expansion代表建设用地扩张水平；DEM为海拔高度；Slope为坡度；Dis\_city为到最近的地级市中心距离；Dis\_county为到最近的县城距离。





表 4 不同区域空间面板回归模型计算结果  
Tab. 4 Result of spatial panel regression for different regions of China

因变量	Expansion			DEM			Slope			Dis_city			Dis_county		
	东部地区	中部地区	西部地区	东部地区	中部地区	西部地区	东部地区	中部地区	西部地区	东部地区	中部地区	西部地区	东部地区	中部地区	西部地区
	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$	$\delta$ 或 $\lambda$	选取模型	$\delta$ 或 $\lambda$
LPI	-29.531 <sup>a</sup>	-32.6791 <sup>a</sup>	-46.4523 <sup>a</sup>	0.0116 <sup>a</sup>	-0.0013 <sup>a</sup>	-0.0006 <sup>a</sup>	0.5549 <sup>a</sup>	0.1862 <sup>a</sup>	-0.0497 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
ED	1.0025 <sup>a</sup>	1.7322 <sup>a</sup>	3.8824 <sup>a</sup>	0.0000	-0.0006 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	-0.0242 <sup>a</sup>	-0.1080 <sup>a</sup>	0.0075 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
NP	-0.3719 <sup>a</sup>	1.6604 <sup>a</sup>	7.5169 <sup>a</sup>	0.0004 <sup>a</sup>	0.0004 <sup>a</sup>	-0.0005 <sup>a</sup>	-0.0539 <sup>a</sup>	-0.0551 <sup>a</sup>	-0.0368 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
MPS	167.4843 <sup>a</sup>	-142.1613 <sup>b</sup>	-1073.6834 <sup>a</sup>	0.6892 <sup>a</sup>	0.0771 <sup>a</sup>	0.0485 <sup>a</sup>	14.8995 <sup>a</sup>	3.5402 <sup>a</sup>	-8.3365 <sup>a</sup>	-0.0027 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	0.0024 <sup>a</sup>	0.0018 <sup>a</sup>	0.0041 <sup>a</sup>	0.0087 <sup>a</sup>
AWMSI	-0.0673 <sup>a</sup>	-0.3209 <sup>a</sup>	-0.0367 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0060 <sup>a</sup>	-0.0008 <sup>a</sup>	0.0061 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
AWMPFD	-0.0016 <sup>a</sup>	-0.0126 <sup>a</sup>	0.0033 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0003 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0003 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
PROX_MN	1.7221 <sup>a</sup>	1.6678 <sup>a</sup>	0.3876 <sup>a</sup>	0.0003 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0119 <sup>a</sup>	-0.0154 <sup>a</sup>	0.0323 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
ENN_MN	-247.2975 <sup>a</sup>	-622.4963 <sup>a</sup>	-242.1647 <sup>a</sup>	-0.1610 <sup>a</sup>	-0.1076 <sup>a</sup>	-0.0661 <sup>a</sup>	8.6756 <sup>a</sup>	-8.6759 <sup>a</sup>	-10.0131 <sup>a</sup>	-0.0003 <sup>a</sup>	0.0009 <sup>a</sup>	-0.0012 <sup>a</sup>	0.0014 <sup>a</sup>	-0.0021 <sup>a</sup>	-0.0007 <sup>a</sup>
CONTAG	-22.4641 <sup>a</sup>	-26.0176 <sup>a</sup>	-21.7274 <sup>a</sup>	0.0012 <sup>a</sup>	-0.0018 <sup>a</sup>	-0.0007 <sup>a</sup>	0.5581 <sup>a</sup>	0.0857 <sup>a</sup>	-0.2744 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
COHESION	-4.0664 <sup>a</sup>	-9.1757 <sup>a</sup>	-8.8506 <sup>a</sup>	0.0078 <sup>a</sup>	-0.0002 <sup>a</sup>	-0.0001 <sup>a</sup>	0.0561 <sup>a</sup>	0.0380 <sup>a</sup>	-0.0100 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
SHDI	0.2426 <sup>a</sup>	0.5348 <sup>a</sup>	0.5960 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0020 <sup>a</sup>	-0.0032 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
SHEI	0.1778 <sup>a</sup>	0.3212 <sup>a</sup>	0.2712 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	-0.0013 <sup>a</sup>	-0.0010 <sup>a</sup>	0.0023 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0000	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
因变量	东部地区			中部地区			西部地区								
LPI	0.7470 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.6660 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6940 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SAR-TFE	0.6940 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
ED	0.7460 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.7780 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.7770 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SAR-TFE	0.7770 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
NP	0.7010 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6280 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.7080 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SAR-TFE	0.7080 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
PD	0.7240 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6060 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.7000 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.7000 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
MPS	0.7030 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.5620 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6390 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SAR-TFE	0.6390 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
AWMSI	0.6160 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.5830 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.5830 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.5830 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
AWMPFD	0.6400 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.5940 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6090 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.6090 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
PROX_MN	0.5080 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.5410 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.4600 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SEM-TFE	0.4600 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
ENN_MN	0.1940 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.2340 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.2090 <sup>a</sup>	SEM-TFE	SAR-TFE	0.2090 <sup>a</sup>	SEM-TFE						
CONTAG	0.6679 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.5930 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6260 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.6260 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
COHESION	0.7270 <sup>a</sup>	SEM-TFE	0.6389 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6860 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.6860 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
SHDI	0.7510 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.7220 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.7350 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.7350 <sup>a</sup>	SAR-TFE						
SHEI	0.6690 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6230 <sup>a</sup>	SAR-TFE	0.6640 <sup>a</sup>	SAR-TFE	SAR-TFE	0.6640 <sup>a</sup>	SAR-TFE						

注：SAR-TFE为时间固定效应空间自相关面板模型，SEM-TFE为时间固定效应空间误差面板模型。东部地区格网样本量为10107；中部地区格网样本量为11378；西部地区格网样本量为8012。a为在1%的水平上显著；b为在5%的水平上显著；c为在10%的水平上显著。Expansion代表土地建设用地扩张水平；DEM为海拔高度；Slope为坡度；Dis\_city为到最近的地级市中心距离；Dis\_county为到最近的县城距离。模型选择运用LM和稳健LM，包括LM空间滞后、LM空间误差、稳健LM空间滞后、稳健LM空间误差；检验结果由于篇幅有限，并不在此展示。

块类型的主导性提高, 景观的破碎化程度降低, 这也揭示了建设用地扩张对景观斑块类型主导性的影响具有显著的城乡梯度效应。

从不同规模城市的对比来看, 建设用地扩张水平的提升对LPI的影响存在显著的差异性, 与预期结果不同的是小城市建设用地扩张的影响最为强烈, 中等城市次之, 大城市最弱。例如, 小城市建设用地扩张水平每提高1‰将使最大斑块所占景观面积的比例降低5.1%, 中等城市为4.2%, 大城市仅为1.4%。结果还显示, 大城市的坡度提升对LPI的影响为负, 而对其他城市的影响为正。因此, 对大城市而言随着建设用地扩张水平的提升, 坡度越高的城市其景观斑块类型的主导性越低。

从不同区域城市的对比来看, 建设用地扩张对LPI的影响存在显著的区域梯度效应, 西部地区建设用地扩张水平每提高1‰将使最大斑块所占景观面积的比例降低4.6%, 中部地区为3.3%, 东部地区为3.0%。同样与预期不同, 说明西部地区随着建设用地扩张水平的提升将使最大斑块所占景观面积的比例降低的更加明显。结果还显示, 东部地区城市的海拔高度变化对LPI的正向影响最强烈, 但对中西部地区的影响为负。说明对东部地区城市而言, 随着海拔高度的提升, 景观的主导性越来越强, 而对中西部地区的影响则相反。坡度也表现出类似的趋势, 只是对中部城市的影响显著为正。

同时, 结果显示建设用地扩张与ED指数显著正相关, 表明随着建设用地扩张水平的提升, 单位面积内景观斑块的边缘长度不断增大, 景观格局也趋于破碎化。ED指数之所以不断变大可能与建设用地扩张对景观的干扰相关, 容易导致斑块出现破碎化。其他控制要素除坡度要素外, 其他要素均与ED指数变化有显著关系。其中, 海拔高度与ED指数显著正相关, 说明随着海拔高度的上升, 景观单位面积内的斑块边缘密度显著提升。

从不同规模城市的对比来看, 建设用地扩张水平的提升对ED指数的正向影响存在显著的差异性。其中, 小城市建设用地扩张的影响最为强烈, 中等城市次之, 大城市最弱。例如, 小城市建设用地扩张水平每提高1‰将使ED指数提高4.1%, 中等城市为2.8%, 大城市仅为0.6%。这一结果与LPI指数相类似, 进一步印证了小城市的建设用地扩张更容易导致景观的破碎化。

从不同区域城市的对比来看, 建设用地扩张对ED指数的影响同样存在显著的区域梯度效应。其中, 西部地区最强, 中部次之, 东部最弱, 说明西部地区随着建设用地扩张水平的提升其对景观的影响更为强烈, 将使ED指数增长的更加明显。进一步推理可知, 西部地区生态环境本底脆弱, 在西部地区开展建设用地扩张需要审慎处理好其对景观的影响, 防范由此引发的生态风险。

**3.3.2 密度大小及差异指数** 全样本回归结果显示, 建设用地扩张与NP指数显著正相关, 建设用地扩张水平每提高1‰将导致景观斑块数量提高0.45%左右, 说明随着建设用地扩张水平的提高, 人类活动强度不断提高, 其对景观的改造更为强烈, 更容易产生小斑块, 导致斑块数量增多, 破碎化趋势明显。但是坡度因素对景观斑块数量的影响显著为负, 即坡度每提高1°将导致景观斑块数量降低0.12%左右。区位因素均表明, 随着到地级城市中心和县城中心距离的增加, 景观斑块数量则会减少, 说明随着建设用地扩张水平的梯度降低, 景观斑块数量和破碎化程度在空间上存在从城市边缘到乡村减少的趋势。

不同规模城市对比显示, 大、中、小城市建设用地扩张水平的提升对NP指数的影响存在显著的差异性。突出的发现就是大城市的建设用地扩张水平提升并不会导致景观斑块数量的增加, 相反建设用地扩张水平每提高1‰将导致NP指数降低0.61%。但是对中小城市而言, 建设用地扩张水平每提高1‰将导致景观斑块数量增长2.4%和6.5%。由此可见, 虽然从全样本回归可知建设用地扩张与NP指数显著正相关, 但其内部存在显著分



化。与本文的预期并不一致,小城市的建设用地扩张更容易导致景观斑块数量的增多,大城市却表现出显著的抑制作用。由此可知,中小城市的景观破碎化更为严重,由于建设用地面积基数较小,建设用地的扩张对其景观的切割作用更为明显。

从不同区域城市的对比来看,建设用地扩张对NP指数的影响同样存在显著的区域梯度效应。其中,对东部地区城市而言,建设用地扩张水平的提升将抑制景观斑块数量的增多。而对中西部地区城市而言却相反,其中对西部地区的影响尤为强烈,建设用地扩张水平每提高1%将导致西部地区城市的景观斑块数量提高7.5%左右,进一步印证了在西部地区推进建设用地扩张更容易导致景观斑块的破碎化,说明需要审慎对待中西部地区的建设用地扩张,以减少其对景观的破坏。但同时也发现,由于海拔高度和坡度的提升,西部的高海拔和高坡度地区有助于抑制景观斑块的破碎化。但在,东中部地区海拔高度的抑制作用并不显著,只有坡度因素起到一定作用。

同时,结果显示建设用地扩张与MPS指数显著负相关,建设用地扩张水平每提高1‰,将导致MPS指数降低8.8%,说明随着建设用地扩张水平的提升景观平均斑块面积逐步缩小,破碎化趋势凸显。海拔高度和坡度对MPS指数的影响均显著为正,说明由于人类的干扰相对较小,海拔越高和坡度越大的地区其景观的平均斑块面积往往越大。而到地级城市中心和县城中心的距离因素对MPS指数的影响均显著为正,说明距离城市越远景观平均斑块面积往往越大,距离城市越近越容易导致景观平均斑块面积的缩小进而导致景观破碎化。

从不同规模城市的对比来看,与传统的认知不同,大城市的建设用地扩张更容易导致景观平均斑块面积的增加,意味着大城市的建设用地扩张并不会带来景观的破碎化,相反还会更为紧凑。但是对中小城市而言,建设用地扩张水平的提高将导致景观平均斑块面积的降低,破碎化也会更为明显。海拔高度和坡度因素对大、中、小城市景观平均斑块面积均产生显著的正向影响,其中坡度因素的影响表现出显著的梯度性,小城市的坡度提高更容易导致MPS指数的提高,中等城市次之,大城市最弱。

从区域对比来看,建设用地扩张对MPS指数影响的区域梯度效应更为明显。其中,东部地区的城市建设用地扩张将导致景观平均斑块面积的增大,而中西部地区则表现为显著的负向影响,即建设用地扩张水平的提升将导致景观平均斑块面积的减小,尤以西部地区最甚。进一步说明,西部地区的建设用地扩张需要审慎对待其对景观格局的影响。海拔高度对三大区域MPS指数的影响均显著为正。其中,东部地区的高海拔地区最不容易导致景观斑块的破碎化。从坡度来看,同样是西部地区随着坡度的增大将导致其景观斑块的破碎化会有所增强,而东中部地区则不然。

**3.3.3 形态复杂度指数** 结果显示建设用地扩张与AWMSI指数和AWMPFD指数均显著负相关。这一结果与预期并不一致,建设用地扩张水平的提升之所以会导致景观复杂度的降低,一个可能的原因是在建设用地扩张与景观复杂度的变化在空间上可能存在错位,另一个原因可能是回归分析的平均化处理导致部分信息无法表现出来。由图6可知,景观复杂度变化的主要区域集中在多数的高密度城镇化地区,但是这些地区的建成区比率已经足够高,后期建成区比率增长的幅度并不会很大。而其他建设用地扩张区域由于建成区比率基数小却经历了显著的增长。但是这些区域由于城市用地比率和面积本身偏小,建设用地扩张并不会对10 km格网内的景观复杂度构成显著的影响。例如,AWMSI指数和AWMPFD指数减小和不变的区域占据样本的60%左右,增大的区域比例却占到不足40%。同时发现,海拔高度对景观复杂度的影响显著为正,但影响系数较小,说明高海拔地区城市景观的复杂度往往越高。

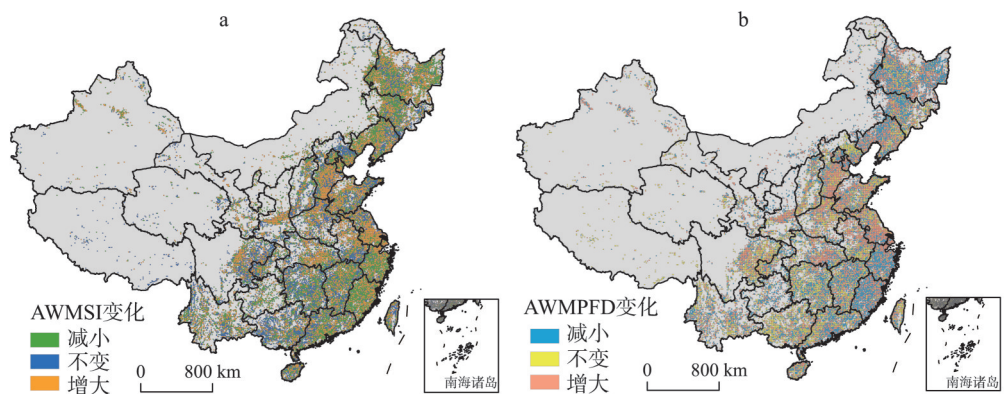


图6 1975-2014年中国AWMSI指数和AWMPFD指数变化情况  
Fig. 6 Variations of AWMSI and AWMPFD metrics in China from 1975 to 2014

从不同规模城市的对比来看，小城市建设用地扩张对景观复杂度的影响最为强烈，中等城市次之，大城市最弱。但从AWMPFD指数来看，只有中等城市建设用地扩张对其的影响显著为负。

从不同区域的对比来看，中部地区建设用地扩张水平的提升更不容易导致景观复杂度的提高。坡度因素对景观复杂度的影响存在显著的区域差异性。其中，从AWMSI指数来看，在东、中部地区坡度越高的地区景观的复杂度越低，但西部地区却是坡度越高的地区景观的复杂度越高。从AWMPFD指数来看，只有东部地区坡度越高的地区景观的复杂度越低，中西部地区坡度越高的地区景观的复杂度越高。

**3.3.4 邻近度指数** 全样本回归结果显示，建设用地扩张与PROX\_MN指数显著正相关，说明随着建设用地扩张水平的提升景观内部同类型斑块间的邻近度有所提高。同时发现，建设用地扩张与ENN\_MN指数显著负相关，同样说明建设用地扩张水平的提高在一定程度上使同类型斑块间的距离变近，景观内部同类型图斑呈现出团聚分布的趋势。海拔高度和坡度因素均对平均邻近指数产生显著的正向影响，说明高海拔和高坡度的地区景观内部同类型斑块间的邻近度提高的更快。二者对ENN\_MN指数的影响显著为负，同样说明高海拔和高坡度地区会使景观内同类型斑块间的距离变近，在这些地区更容易出现同类型斑块的团聚分布。除到地级城市中心距离因素对PROX\_MN指数显著为正外，距离因素均与两个邻近度指数显著负相关，说明由于建设用地扩张的推进城市和县城周边地区景观内同类斑块间的距离更近、邻近性更高。

不同规模城市对比表明，大、中、小城市建设用地扩张水平的提升对PROX\_MN指数的正向影响和对ENN\_MN指数的负向影响存在显著的差异性。其中，中等城市建设用地扩张水平的提升对PROX\_MN指数的正向影响最强烈。小城市建设用地扩张水平的提升对ENN\_MN指数的负向影响最强烈，中等城市次之，大城市最弱，表明小城市的建设用地扩张更容易导致景观斑块分离度的提高以及景观的破碎化。

从不同区域城市的对比来看，建设用地扩张对PROX\_MN指数正向影响的区域梯度效应更为明显，其中，东部地区的影响系数最大，中部地区次之，西部地区最小。但从ENN\_MN指数来看，建设用地扩张水平的提升对中部地区的影响最大，东部地区次之，西部地区最小。

**3.3.5 聚散性指数** 回归结果显示，建设用地扩张与CONTAG指数显著负相关，说明随着建设用地扩张水平的提升，景观聚集度出现降低趋势，优势斑块类型并未形成良好的

连接性,景观的破碎化程度越来越高。同样,建设用地扩张与 COHESION 指数显著负相关,说明随着建设用地扩张水平的提高,景观的结合度和物理连接度呈现降低趋势。地形和坡度因素对景观聚集度的影响均为显著负向,说明在高海拔和高坡度地区景观的聚集度降低的更快。

不同规模城市对比表明,小城市的建设用地扩张更容易导致景观聚集度和景观结合度的降低,中等城市次之,大城市最弱。主要原因是小城市的建设用地基数小,相同比率扩张的影响对建设用地景观格局指数的影响更为明显,对景观连接性和结合度的破坏性相比大城市更大。同时发现对大城市而言,坡度因素对景观聚集度和景观结合度的影响显著为负。

从不同区域的对比来看,中部地区建设用地扩张对两个指数的影响最为强烈,说明中部地区的建设用地扩张更容易导致其景观连接性和结合度的降低。海拔高度对东部地区城市的影响显著为正,而对中西部地区的影响显著为负,表明对东部地区而言随着海拔高度的提升景观的聚集度和结合度越来越高,但是对中西部地区城市而言却相反。坡度因素对西部地区两个指数的影响显著为负,但对东中部地区的影响则显著为正,说明随着坡度的提升对西部地区而言更容易导致景观连接度和结合度的降低。进一步表明,西部地区的建设用地扩张需要审慎对待,尤其是在地形坡度高的地区,以减小其对景观连接性和结合度的影响。

**3.3.6 多样性指数** 回归结果显示,建设用地扩张与 SHDI 指数和 SHEI 指数均显著正相关,表明建设用地扩张有助于景观多样性的增强,同时景观的均匀分布趋势也有所提高。可能的原因是随着建设用地的扩张,其对景观的切割作用越来越明显,同一类型图斑由于不同用地需求的驱动被不断细分,从而导致单位面积内的景观类型增多。海拔高度对两个指数的影响均为显著正向,说明高海拔地区景观的多样化和均匀分布更为明显。但坡度因素却表现出不同的趋势,其对 SHDI 指数的影响显著为负,说明高坡度地区景观的多样性低。

从不同规模城市来看,建设用地扩张水平更容易引起小城市景观多样性和景观均匀度的提高,中等城市次之,大城市最弱。说明建设用地扩张对小城市景观的切割和细化作用最为明显,可能原因是城市建设用地面积基数越大,其对整体景观的影响相对越难,而对小城市越容易。坡度因素对 SHDI 指数的影响也表现为显著的差异性,即小城市坡度因素的影响最为强烈,中等城市次之,大城市最弱。

区域对比表明,建设用地扩张对 SHDI 指数的影响西部地区最显著、中部地区次之、东部地区最弱。可能原因是西部地区地形多变,加之其自身的景观多样性水平高,建设用地扩张更容易导致景观多样性水平的提高,而东部地区平原面积大,景观多样性基础水平低,用地扩张不容易引发景观多样性水平的提高。对 SHEI 指数来说稍有差别,其中建设用地扩张对中部地区景观均匀度的影响最为强烈,西部地区次之,东部地区最弱。坡度因素对东中部地区景观多样性和景观均匀度具有显著的负向影响,即坡度越高的地区景观的多样性和均匀度越低。只有在西部地区出现例外,该地区随着坡度的提升景观的均匀度将会提高。

## 4 结论

(1) 全国所有样点 40 年间建成区比率值增长了 3 倍,高于同期的人口建设用地扩张增长水平。1975-1990 年、1990-2000 年和 2000-2014 年 3 个时间段的年均增速分别为



5.87%、2.32%和2.32%。同时,从城市规模和区域差异来看,建设用地扩张的内部差异显著,在东部、中部和西部间呈现出显著的梯度差异性,而且不同区域的差异程度逐步增加。同时,发现大城市、中等城市和小城市之间的差异也较为显著,建设用地扩张过程从单个城市为中心逐步扩展开来,逐步形成区域建设用地扩张的发展趋势。

(2) 由于人类活动的加剧,1975-2015年中国的景观格局经历了显著变化。景观内优势景观类型的主导性逐步降低,表明人类活动对景观的干扰强度和频率不断增强。单位面积内的边缘长度不断增大,斑块数量增多,平均斑块面积渐小,反映出景观格局趋于破碎化的趋势,导致生境的破碎化。1990年之后景观复杂度逐步增强,变得越来越不规则,边缘效应也逐步增强;整体的景观复杂度增强,但是增强的幅度并不显著;同类型斑块间相隔距离逐渐变远,分布也较离散。聚集度指数逐步减小,表明景观是具有多种要素的密集格局。景观内的斑块在空间分布上变得越来越聚合和集群,相应的结合度也越来越高。斑块类型增加导致景观类型呈现均衡化和均匀分布趋势。

(3) 基于4个时间点的绝对数值建模结果发现,随着建设用地扩张水平的提高,其侵占的生态用地和耕地等地类的面积越来越大,从而导致景观斑块类型的主导性降低,单位面积内斑块的边缘长度不断增大,斑块数量不断增加,景观平均斑块面积逐步缩小,破碎化趋势明显。但是建设用地扩张水平与景观复杂度的变化在空间上可能存在错位。随着建设用地扩张水平的提升景观内部同类型斑块间的邻近度有所提高,并呈现出团聚分布的趋势;容易导致聚集度出现降低趋势;景观越来越呈现多种要素的密集格局;景观的多样性逐渐增强,同时均匀分布趋势也会有所增强。未来可以运用相对比数据建模,验证结果的可靠性。

(4) 建设用地扩张对景观格局的影响存在显著的城市规模差异和区域差异。大城市由于建设用地扩张水平高其对景观格局指数的影响并不及小城市和中等强烈。同时发现不同城市之间的梯度差异性显著,说明提高土地利用效率、存量用地再开发、用地空间布局 and 结构优化、城市生态修复、城镇增长边界和生态红线划定等相关的政策制定需要充分考虑城市规模的差异。西部地区建设用地扩张对景观格局的影响更为强烈,中部地区次之,东部地区最弱,影响的梯度效应显著。同时也验证了区域差别化政策制定的必要性。在建设用地扩张管治政策制定中需要综合考虑这些因素。

## 参考文献(References)

- [1] National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2018. Beijing: China Statistics Press, 2018. [国家统计局. 中国统计年鉴2018. 北京: 中国统计出版社, 2018.]
- [2] Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [3] Bai X, Shi P, Liu Y. Society: Realizing China's urban dream. *Nature*, 2014, 509(7499): 158-160.
- [4] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land use on climate change. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [5] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 1990, 4(1): 21-30.
- [6] McGarigal K. Fragstats v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps- Help Manual. University of Massachusetts, Amherst (<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>), 2014.
- [7] Weng Y C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and urban planning*, 2007, 81(4): 341-353.
- [8] Deng J S, Wang K, Hong Y, et al. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(3): 187-198.
- [9] Yeh C T, Huang S L. Investigating spatiotemporal patterns of landscape diversity in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 93(3-4): 151-162.
- [10] Buyantuyev A, Wu J, Gries C. Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3): 206-217.

- [11] Su S, Jiang Z L, Zhang Q, et al. Transformation of agricultural landscapes under rapid urbanization: A threat to sustainability in Hang-Jia-Hu region, China. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 439-449.
- [12] Su S, Xiao R, Jiang Z L, et al. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. *Applied Geography*, 2012, 34: 295-305.
- [13] Zhou X, Wang Y C. Spatial-temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 268-277.
- [14] Li H L, Peng J, Liu Y X, et al. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: A spatial heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 50-60.
- [15] Bartholome E, Belward S. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(9): 1959-1977.
- [16] Arino O, Gross D, Ranera F, et al. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS. *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IEEE International, IGARSS 2007)*, Barcelona, Spain, 23-28 July 2007.
- [17] Schneider A, Friedl M A, Potere D. A new map of global urban extent from MODIS data. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 044003.
- [18] CIESIN. Global Rural- Urban Mapping Project (GRUMP)- Urban extents. Center for International Earth Science Information Network. Online: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/grump-v1-urban-extents>, 2004.
- [19] Elvidge C, Imhoff M L, Baugh K E, et al. Nighttime lights of the world: 1994-1995. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 56(2): 81-99.
- [20] Bhaduri B L, Bright E A, Coleman P R, et al. Landscan: Locating people is what matters. *Geoinformatics*, 2002, 5(2): 34-37.
- [21] Esch T, Marconcini M, Felbier A. Urban footprint processor-fully automated processing chain generating settlement masks from global data of the TanDEM-X mission. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1617-1621.
- [22] Pesaresi M, Melchiorri M, Siragusa A, et al. Atlas of the Human Planet 2016. Mapping Human Presence on Earth with the Global Human Settlement Layer, EUR 28116 EN, 2017.
- [23] JRC. A global human settlement layer from optical high resolution imagery concept and first results. European Commission Joint Research Center-Institute for the Protection and Security of the Citizen. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [24] Anselin L. *Spatial Econometrics: Method and Models*. Dordrecht: Kluwer, Dordrecht, 1988.
- [25] Anselin L, Bera AK, Florax R, et al. Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional Science and Urban Economics*, 1996, 26(1): 77-104.
- [26] Christina D H, John A B, John L D. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology*, 1998, 13(3): 167-186.

## Impacts of construction land expansion on landscape pattern evolution in China

LI Guangdong<sup>1,2</sup>, QI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Exploring the impact mechanisms of construction land expansion on landscape pattern changes is one of the critical tactics to understanding how human activities affect ecosystem function, pattern, and process change. However, the lack of macro-scale data and spatial analysis methods on construction land expansion and landscape has hindered China's national scale study. In response to this, here we use the recently available built-up area ratio

data and the corresponding land use data to characterize the spatiotemporal process of construction land expansion and landscape metrics between 1975 and 2014 based on the 10 km grids at the national scale. And the spatial econometric model was adopted to quantitatively investigate the influence mechanism of construction land expansion process on landscape pattern evolution. At the same time, the spatial-temporal heterogeneity of the influence of construction land expansion process on the evolution of landscape pattern is examined based on the comparisons, different scale cities and different regions of China. The study found that the value of built-up area ratio has increased by threefold in the past 40 years, which is higher than the growth level of demographic urbanization in the same period. The construction land expansion has significant gradient differences between the eastern, the central and the western regions, and the gradation of difference is gradually increasing. Average annual growth rates are 5.87%, 2.32% and 2.32%, respectively, in periods 1975-1990, 1990-2000 and 2000-2014. Meanwhile, the differences between large, medium-sized and small cities are also significant. Owing to the effects of frequent human activities, the landscape pattern has also experienced significant changes. For example, the dominance of leading type has gradually decreased, the landscape pattern has become fragmented, the complexity has increased, the proximity has become more discrete, the contagion has gradually decreased, the cohesion has increased, and landscape diversity and evenness have increased. With the improvement of construction land expansion level, the landscape is becoming more and more fragmented, and the intensity and frequency of human interference to the landscape are also increasing. Every 1% increase in the expansion of construction land, for example, caused a 0.45% increase in the number of patches. However, the changes in construction land expansion level and landscape complexity are spatially mismatched. To the extent that the improvement of the level of construction land expansion has brought the distance between the same types of patches and the contagion index has decreased, and the landscape became more and more dense and aggregating, and the corresponding cohesion degree is also getting higher and higher, and the landscape equalization and even distribution are more and more obvious. At the same time, it is found that the influences of different time periods, different scale cities and different regions are significant for impact mechanisms of construction land expansion on landscape pattern changes. Besides geographical location, the other control factors have different influences on the evolution of landscape pattern.

**Keywords:** construction land expansion; landscape pattern; impact mechanism; spatial econometric model; spatial-temporal heterogeneity; China