

基于夜间灯光遥感数据的环洞庭湖 生态经济区城市群时空扩展

李茜铭¹ 郑伯红¹ 熊羽军²¹

(1. 中南大学 建筑与艺术学院, 中国湖南 长沙 410083;

2. 32022 部队, 中国湖北 武汉 430070)

【摘要】: 文章基于 1993—2017 年环洞庭湖生态经济区城市群 DMSP/OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据与 ArcGIS, 采用参考数据辅助对比法提取城市群建成区范围, 利用 Landsat8 遥感影像和 Kappa 系数进行精度检验, 运用时空扩展规模、重心偏移及景观格局形态分析方法对城市群演变进行分析。主要结论如下: ①动态阈值法提取夜光数据城市群建成区与实际符合, 演变规律与规划、经济和政策贴合, 经过中速调整过渡—高速边缘扩展—低速内部填充—快速飞地式扩展过程, 呈现复杂周期性变化。②城市群重心由荆州市石首市南移至益阳市南县内, 常德市与岳阳市主导城市群快速发展。③景观格局破碎度较高, 空间连通性较弱, 城镇相对独立, 城市群呈“五核”空间扩展模式。

【关键词】: 城市建成区 景观格局 重心分析 生态保护

【中图分类号】: F129.9 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 02-0092-11

城市空间扩展是由于经济社会发展需求, 人口不断向城市聚集, 生产、生活空间多方位扩展的过程。城市空间扩展是城镇化进程, 是人类社会现代化演变过程与特征表现, 亦是国家和地区综合发展水平的体现。中央政府在“十三五”规划中已将发展城市群作为实施新型城镇化战略的举措之一。中国城市建成区从 1981 年的 7438km², 发展到 1993 年的 17416km², 扩展至 2017 年的 56225.4km², 24 年建成区面积增长 38809.4km², 平均每年 1617.1km²。中国城镇化率由 1981 年的 20.16%, 提升至 1993 年的 27.99%, 至 2017 年的 58.52%。近年来, 城镇化快速发展的同时出现了一系列的城市问题, 如 Grimm N.B 等研究发现, 生态问题集中在全球大规模城市化地区 (即城市群地区)^[1]。因此, 准确、及时地获取城市扩展信息, 研究分析其时空扩展规模及规律是亟待解决的问题, 同时对合理制定政策和完善规划措施, 实现城市群可持续发展具有重要意义与参考作用。

针对城市群时空扩展问题, 国内外学者从扩展的演变规律及驱动因素等方面进行了一系列的研究。Birte Schoettker 等以北威州为典型对象, 利用三个时间段 (1975、1984 和 2001) 高清遥感影像, 来研究城市土地利用类型的变化, 城市的密集发展和扩展^[2]; Yikalo H.A 利用三年 (1990、2000 和 2006) 地理数据资料, 分析了葡萄牙塞特巴地区城市建成区扩张特征^[3]; 王翠平等利用 DMSP/OLS 夜光数据探究了三个城市群 (京津冀、长三角和珠三角) 用地扩张特性, 并研究其驱动因素^[4]; Wu 等利用城市

作者简介: 李茜铭 (1990-), 女, 湖南岳阳人, 博士研究生, 研究方向为城市空间结构与发展控制、基于遥感数据的城市分析。

E-mail: 188379083@qq.com

郑伯红 (1966-), 男, 广东韶关人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡功能结构网络化与网络城市、城市空间与发展控制。

E-mail: 2543930211@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51478470); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2018B075); 中南大学研究生自主探索创新项目重点项目 (502221802)

空间辐射效应的量化来测量城市群的边界范围,从而分析其空间结构变化趋势^[5];Sheng 等基于异速生长和分形理论分析美国城市规模分布变化,用位序规模法则揭示其扩张规律^[6];公维民等以 1992—2012 年 5 年的 DMSP/OLS 夜光数据与 2016 年 Landsat 数据为基础,提取兰白西城市群建成区,采用形态紧凑度、扩展强度和空间关联模型对扩展过程进行特征分析^[7];ZhuoLi 等利用 1995—2014 年 Landsat 数据与 Autologistic-CLUE-S 模型,对长株潭城市群的扩张、发展和政策等方面进行分析^[8]。大量文献研究表明利用遥感数据提取城镇建成区时空分布信息及探究城市群演变规律具有科学性和指导性。

近十年,学者主要用社会经济统计数据和中高分辨率遥感数据来获取城市群扩展的动态信息。前者因缺乏足够的空间信息,难以在空间上表示扩展过程;后者由于数据获取运算复杂低效,难以对大尺度空间的数据及时获取处理。目前,国内运用夜光遥感对城市时空扩展的研究时间较短,因为分辨率差异较大,少有学者结合 DMSP 和 NPP 两颗卫星数据做研究,并且,长时间序列的城市群扩展研究较单个城市的研究是缺乏的,小城镇的研究与大城市相比是稀缺的,当前研究大多侧重于几个单独年份时间截面上城市扩展驱动机制、城市扩展模拟、空间分异、监测与预测等方面的分析,在整体上对时序特征的观察和研究不足。2014 年 4 月,国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》^[9],而洞庭湖生态经济区城市群作为一个新的区域目前尚未见有人研究其城市扩展,因为省份跨度、数据寻找困难等原因常把湖南湖北分开研究,且侧重点更多的在生态与经济,而忽视了小城镇的空间变化对其影响。因此,本文选用 1993—2013 年 DMSP/OLS 和 2014—2017 年 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据,以环洞庭湖生态经济区城市群为研究对象,采用参考数据辅助对比法,经过 Landsat8 和 Kappa 系数精度检验提取城市群城镇建成区,计算该城市群时空扩展规模、城镇重心偏移和景观格局形态分析方法,定性定量、客观揭示环洞庭湖生态经济区城市群 24 年来扩展的时空过程、特征及规律,以期对滨湖城市及城市群可持续发展、优化空间结构与布局、土地节约集约利用、政策制定和改善生态环境等起到一定的参考作用。

1 研究区域、数据来源与研究框架

1.1 研究区域

环洞庭湖生态经济区城市群范围包括湖南省益阳市、常德市、岳阳市和长沙市望城区,湖北省荆州市(4 市 1 区),共 33 个县(市、区)。其中益阳市现辖 2 个城市区(资阳区、赫山区),1 个县级市(沅江市),3 个县(安化县、桃江县、南县);常德市现辖 2 个城市区(武陵区、鼎城区),1 个县级市(津市),6 个县(汉寿县、桃源县、临澧县、石门县、澧县、安乡县);岳阳市现辖 3 个城市区(岳阳楼区、君山区、云溪区),2 个县级市(汨罗市、临湘市),4 个县(岳阳县、平江县、湘阴县、华容县);荆州市现辖 2 个城市区(荆州区、沙市区),3 个县级市(松滋市、石首市、洪湖市),3 个县(江陵县、公安县、监利县)。至 2017 年末,区域总面积为 60411km²,常住人口约 2337.81 万人,GDP 为 10742.48 亿元。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据

DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据,来源于美国国家地球物理数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/>),自 1976 年 9 月 DMSP 卫星(美国国防气象卫星计划)首次搭载 OLS 传感器开始获取数据,从 F1 更新至 2010 年的 F18,在 1992 年以后为数字信息,为大尺度城市扩展研究提供了新的数据形式。本文提取 1993—2013 年的 DMSP/OLS 灯光数据,该数据消除了云、烟及火光等偶然光线的影响,对全年可见光和 NVIR 通道灰度值直接进行平均化处理,为栅格灰度遥感影像,灰度值范围 0~63,63 为饱和灯光灰度值(图 1)。

VIIRS/DNB 夜间灯光遥感数据,来源于美国国家地球物理数据中心(<https://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/>),2011 年 10 月美国新一代国家极轨业务环境卫星系统发射首颗 Suomi-NPP 卫星,本文提取 2015—2017 年的 Tile3(75N/060E)VIIRS/DNB 灯光数据,该数据无月光照射下微光通道资料,辐射校正精度更高,为栅格灰度遥感影像,由于灰度级增加,像元不存在饱和值,

空间分辨率增加，像素跳变减少。

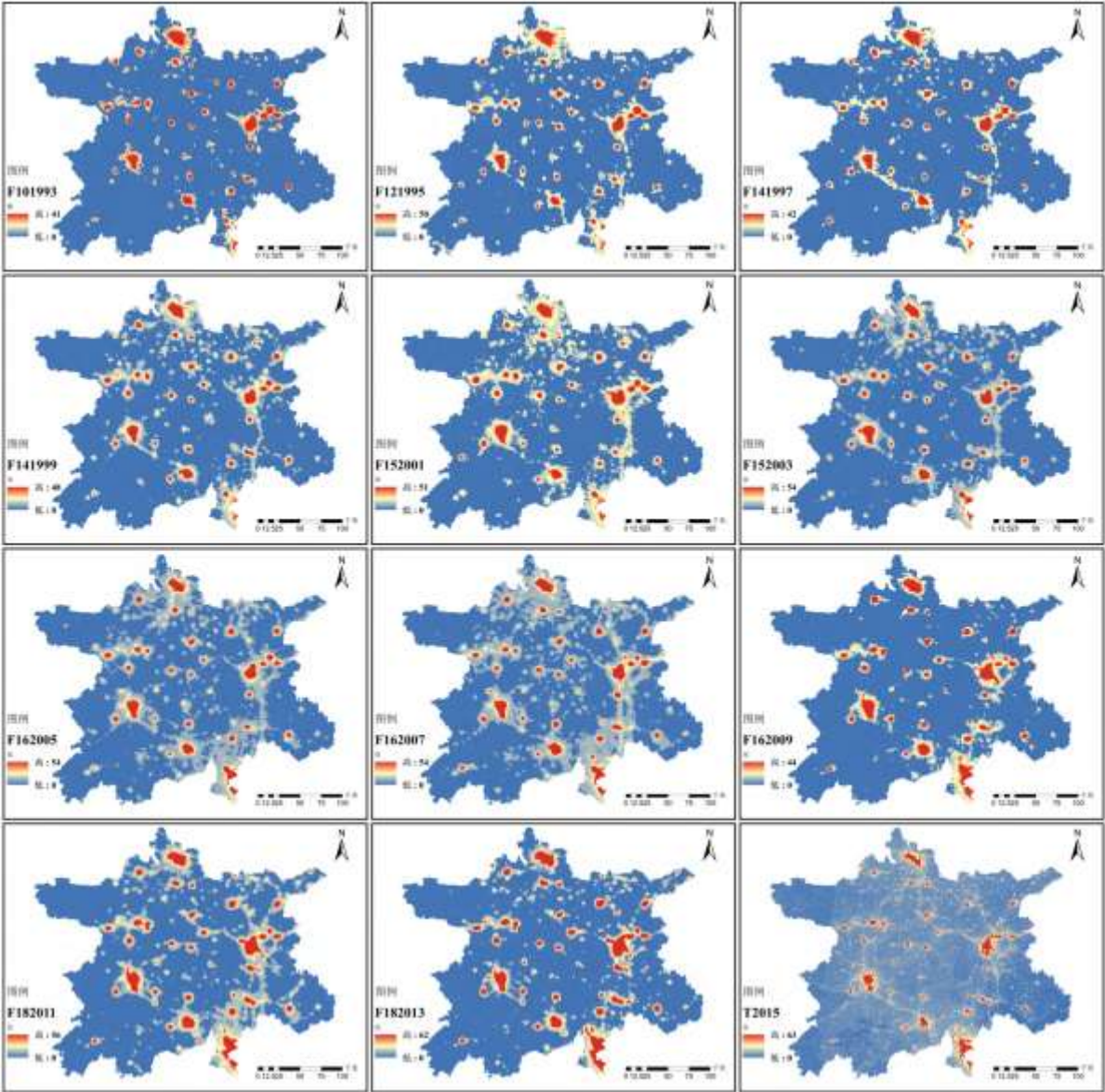


图 1 1993—2017 年环洞庭湖生态经济区城市群静态夜间灯光遥感数据图

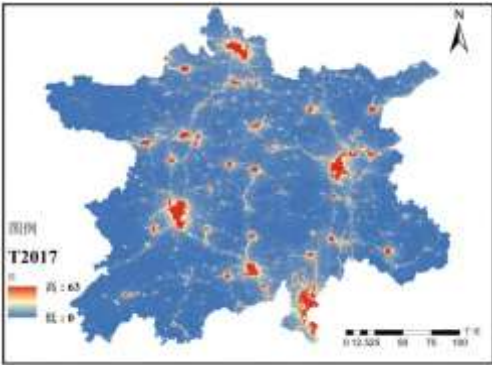


图 1 1993—2017 年环洞庭湖生态经济区城市群静态夜间灯光遥感数据图

表 1 DMSP/OLS 与 VIIRS/DNB 夜间灯光遥感数据对比

	DMSP/OLS 夜间 灯光遥感数据	VIIRS/DNB 夜间 灯光遥感数据
微光探测最小值	$10^{-5} \sim 10^{-9} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$10^{-5} \sim 10^{-7} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
运行周期长度	850km	824km
采样频率间隔	0.56km	$0.755 \pm 0.022 \text{km}$
获取图像的幅宽	3000km	3040km
空间分辨率	5~7km	400~750m
中心波长	600nm	700nm
波长范围	510~910nm	500~900nm

考虑到 DMSP/OLS 与 VIIRS/DNB 数据 DN 值饱和度不一致,对遥感影像进行初步处理,投影为 WGS1984 坐标系横轴墨卡托(UTM)投影,区域所在坐标(49N),运用 GIS 自校正数据,对 2015 和 2017 年数据运用自然断裂法对其在 0~63 重分类,本研究暂不考虑区域建成区退化为非建成区,利用阈值对建成区灯光值进行修正。

为了提高数据计算准确度,加入精度检测,研究区域运用 2017 年 Landsat8 遥感影像数据,图像数据经过同期数据辐射校正和几何校正,抽样检验精度,数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。

1.2.2 统计数据

本文研究中,使用统计数据主要来源于 1994—2018 年《中国城市统计年鉴》《湖南统计年鉴》和《湖北统计年鉴》等。认定政府发布年鉴数据即是真实城市群建成区范围,并以此为基础作后续研究。

1.2.3 参考数据

中国 1:400 万数据库中,市级与县(区)级面状数据,及来源于国家基础地理信息系统网站(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)的主要河流、湖泊、交通路网、地形等现状数据。

1.3 研究框架

研究方法流程图如图 2 所示。

2 研究方法

2.1 动态阈值法提取城市群建成区面积

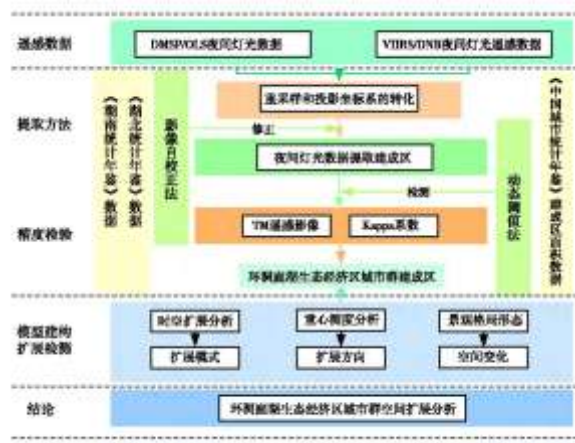


图 2 研究方法流程图

动态阈值法包括 4 种经典的建成区提取方法，分别是经验阈值法、中高分辨率影像数据空间比较法、突变检测法和统计数据法。李俊峰、舒松等对比研究了这 4 种方法，证明统计数据法提取建成区不论是相对误差值还是绝对误差值都是最小，精度是最高^[10-11]。所需要的数据量比中高分辨率影像数据空间比较法少，比突变检测法更合理地展示出了提取建成区的细节，比经验阈值法更具科学性，能精细、快捷地从灯光数据中提取所需建成区范围，并降低灯光溢出效果。

本研究采用参考数据辅助对比法，夜间灯光遥感数据为主要数据源，年鉴数据与 Landsat8 影像作为参考数据，对两种灯光数据进行投影坐标系转化，再通过逐像元算法（影像自矫正法）去噪声，矫正灯光数据，结合统计、参考数据，采用二分法模式来确定不同年份区域最佳灯光阈值，最后利用 30m×30m 高分辨率影像来验证提取信息相对精度，通过 Kappa 系数反复验证，确定最佳提取阈值。

城市群中每个城市作为一个独立单位处理（四市一区），采用二分法来提取环洞庭湖生态经济区城市群城镇建成区范围，当动态阈值下灯光面积与统计年鉴中城市建设用地面积数据（市辖区面积）之差的绝对差值最小时的阈值作为最佳阈值，大于等于该阈值的灯光范围被认为是城镇建成区。

1994—2018 年《中国城市统计年鉴》提供的数据与提取出的建成区面积之间的平均误差值分别为 0.16%、0.22%、0.80%、-1.81%、-3.55%、-0.87%、2.36%、-1.67%、-2.52%、0.15%、2.43%、0.98%和 0.37%。除了在 2001 年误差达到 3.55%之外，其余年份提取城镇建成区面积误差均在 3%之内，数据整体精确度较高。根据每年的动态阈值，提取出建成区空间格局信息，建成区面积分别为 173.02km²、242.6km²、276.59km²、311.78km²、341.15km²、427.95km²、490.14km²、690.90km²、793.43km²、820.99km²、887.28km²、1146.49km²、1167.16km²。

2.2 运用 Kappa 系数精度检验

选择环洞庭湖生态经济区城市群局部区域 Landsat8 30m×30m 高分辨率影像数据作为检验数据，来评价基于参考数据辅助对比法所提取建成区信息的精度^[12-13]。

$$k = \frac{P_x - P_y}{1 - P_y}, P_x = \frac{A + B}{n}$$

$$P_y = \frac{(A + B)(A + C)(B + D)(C + D)}{n^2} \quad (1)$$

Kappa 值实质上是真实一致性与非机遇一致性之比, 其中 P_x 表示两次观察的一致性, P_y 表示两次观察的机遇一致性。通常情况下, Kappa 系数的值落在 0~1 之间, 可分为五种级别一致性: 0~0.20 为较低一致性、0.21~0.40 为普通一致性、0.41~0.60 为平衡一致性、0.61~0.80 为较高一致性和 0.81~1.00 为高度一致性。

本次抽样数据选取对象为 2017 年研究区域局部范围。从上述提取的 2017 年建成区图中, 随机抽取建成区和非建成区各 150 个样本点。用 2017 年 Landsat8 遥感影像为验证依据, 作抽样精度评估, 其结果见表 2。生产者精度和用户精度均达到 82% 以上, Kappa 系数为 0.7533。可知, 利用参考数据辅助对比法所提取建成区数据精度较高, 表明本文方法提取城市建成区数据结果优化后, 可以用来研究城市群时空扩展。

2.3 城市群区域时空扩展规模分析

基于 1993—2017 年不同年份灯光数据, 逐年提取城市群建成区空间范围, 进而可以对城市群时空规模扩展进行研究。规模扩展分析主要包括扩展模式、扩展速度、扩展强度等指标。

扩展模式包罗万象, 一般有同心圆式扩展、轴向扩展、多核心扩展和扇形扩展等扩展模式; 也可以归纳为飞地式、边缘式和填充式等扩展方式; 亦或丰富发散结合, 如走廊式轴向扩展、“点状集聚、组团跳跃”、集中式连片开发、“新区扩展、近域一体”等不同阶段空间扩展特征的体现。

扩展速度指数 (YVI) 是指城市群在不同时期, 建成区面积的绝对增量。

$$YVI = \frac{X_A - X_B}{A - B} \quad (2)$$

扩展强度指数 (YII) 用来反映城市群扩展的强弱、快慢, 使不同时间阶段的扩展具有深度可比性。

$$YII = \frac{X_A - X_B}{(A - B) X_B} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_A 和 X_B 分别为 A 年和 B 年的城市群面积; $A-B$ 为年份差值, 以年为单位。

2.4 城市群区域时空扩展重心分析

城市群建成区重心 (X, Y), 以经纬度为单位, 清楚地分析城市群时空扩展趋势的基本情况。主要研究内容包括重心位置、重心偏移距离、重心偏移角度和重心偏移速度 4 个指标。

重心位置，是研究区域内所有要素坐标的加权平均值。把灰度值作为灯光数据的强度加权计算。

$$X = \sum_{i=1}^n A_i x_i / \sum_{i=1}^n A_i; Y = \sum_{i=1}^n A_i y_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (4)$$

式中：(X,Y)表示城市群建成区重心的经纬度坐标； A_i 为要素第*i*个像元的灰度值（即权重）； x_i 、 y_i 表示第*i*个像元的坐标；*n*为区域内像元要素总和。

重心偏移距离 Δ*D*，是指在某个研究时段内，重心在区域内移动的距离。

$$\Delta D = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + Y_A - Y_B^2} \quad (5)$$

重心偏移角度 α_{*d*}，是指在相应时段内，重心移动的方向与正东夹角。

$$\alpha_d = n\pi + \arctan(Y_A - Y_B / X_A - X_B) (n = 0, 1, 2) \quad (6)$$

重心偏移速度 *V_d*，是指在某个研究时段内，平均移动速度。

$$V_d = \Delta D / (A - B) \quad (7)$$

式中：(X_{*A*}, Y_{*A*})、(X_{*B*}, Y_{*B*}) 分别是第*A*、*B*年重心坐标。

表 2 2017 年 Kappa 系数精度检验混淆矩阵

	城镇用地 (m ²)	非城镇用地 (m ²)	总和 (m ²)	用户精度 (%)
城镇用地 (m ²)	45755629.75	9994065.66	55749695.41	82.07
非城镇用地 (m ²)	7307123.34	86965728.19	94272851.53	92.25
总和 (m ²)	53062753.09	96959793.85	150022546.94	
生产者精度 (%)	86.23	89.69		
		Kappa 系数=0.7533		

2.5 城市群区域时空扩展景观格局形态分析

景观格局形态演变主要指空间格局扩展变化，表现为景观斑块在空间分布与配置上灵活排列的特征。通过景观格局指数来探究景观格局形态，指数能高度浓缩区域信息，计算以 ArcGIS10.2 和 Fragstats4.2 为工具。

Fragstats 景观格局分析软件，可计算多个指标，这些指标分为 3 个级别：Patch（斑块）、Class（斑块类型）和 Landscape（整体景观），级别指数相关性高，逐级扩大尺度。为了避免被选指标对区域景观格局形态特征反映不明显以及关键要素缺失，

通常选取最基础的指标来反映特征，并参考其他学者的研究成果^[14]，综合 3 个级别均衡性选取 15 个指标进行研究。主要包括香浓多样性指数（SHDI）、聚集度指数（CONT）、蔓延度指数（CONTAG）、平均斑块分维数（MPFD）、斑块多度密度（PRD）、斑块面积标准差（PSSD）等。

平均斑块分维数，反映斑块形状的复杂程度，提供量化数据。

$$MPFD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left| \frac{2 \ln(0.25A_{ij})}{\ln(B_{ij})} \right|}{NP} \quad (8)$$

香浓多样性指数，反映景观斑块分布均匀程度与斑块数量。

$$SHDI = -\sum_{i=1}^n [A_i \ln(A_i)] \quad (9)$$

斑块面积标准差，反映景观斑块大小差异度。

$$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[B_{ij} - \left(\frac{TA}{NP} \right) \right]^2}{NP}} \times 10^6 \quad (10)$$

式中：n 是斑块类型数目；m 是类型斑块数目； A_{ij} 是斑块周长； B_{ij} 是斑块面积；NP 是斑块总数；TA 是景观总面积； A_i 是斑块 i 在总面积中占比。

3 数据结果与分析

3.1 城市群区域扩展时间尺度信息提取

环洞庭湖生态经济区城市群的扩展过程，从图 3 可以看出，1993—2001 年，扩展面积和速度变化平缓稳定，而扩展强度有所下降；在 2001—2007 年有阶段性增加的迹象，在 2007 年扩展强度达到最大，增加了 20.48%，期间除了在 2005 年出现回落，总体时间段扩展面积、扩展强度和扩展速度均增加；2007—2011 年，扩展速度由 20.48% 降至 1.74%，扩展面积由 200.76km² 的增加，降为 27.56km²，扩展值均达到峰谷值；在 2011—2015 年，各指标迅速上升，2015 年扩展速度和扩展面积达到最大值 129.6km²/y 和 259.21km²，随后，2017 年又出现回落现象。总体来说区域总面积不断增加，扩展速度和扩展强度几经波折，即将迎来新的上升期，城市群将面临新的加速发展。

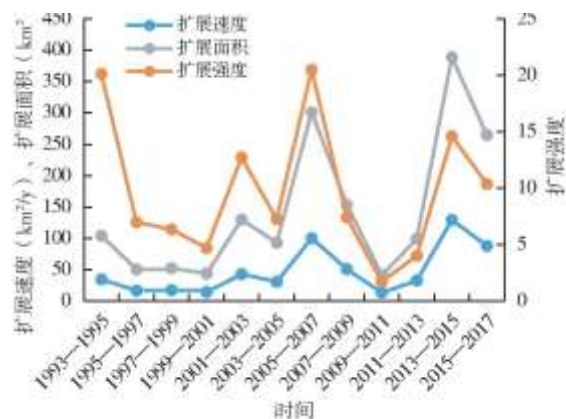


图3 1993—2017年建成区时间尺度扩展统计图

国家、区域等政策因素影响城市群扩展的节奏和趋势。如中国1997—1999年限制审批新的建设用地，制定了保护农业用地的规章制度，使环洞庭湖生态经济区城市群在1997—2001年整体扩展速度强度平缓^[15]；1998年中国取消福利分房政策，同时人口向城镇迁移增加了住房的需求，2003年之后国家推动房地产行业发展政策，地产迅速兴起，土地财政成为了地方政府的依赖，进一步加速2003—2007年城镇建成区的扩展，出现高于人口增长率的过度扩展，城镇处于蔓延状态^[16]；2014年，国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》，推动2013—2015年洞庭湖生态经济区的飞速扩展。

3.2 城市群区域扩展空间尺度信息提取

图4为1993—2017年城市群扩展叠加图，底部为区域地形图，蓝色表示海拔较低地势，以湖泊水域和低平原为主；红色表示海拔较高地势，以岗地、丘陵和山地占优。区域呈现出中、北部低，西、南、东三面高的“U”型地形特征。湖区地势低平的中北部近1/2的面积低于50m，洞庭湖吞长江、纳四水，是典型的过水性湖泊，高中低湖盆地形，夏涝冬枯的水文特征，在一定程度上制约了湖区发展，也促成了湖区独一无二的空间形态^[13]。自然条件是影响城市群扩展的基础，荆州市、岳阳市和常德市等地处海拔较低的平原，地势平坦宽阔，有便利的条件促使城市快速发展；而安化县、石门县和平江县等地处岗地、丘陵，以山地为主，地域狭窄，不利于大规模的开发建设，所以发展缓慢。因为自然条件的差异，使湖区城镇化水平明显低于湖南湖北平均水平。

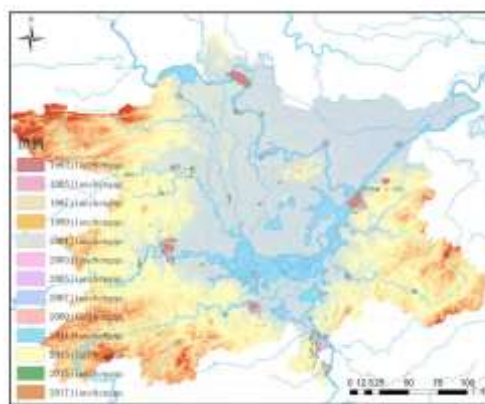


图4 城市群扩展年份斑块叠加图

2001—2007 年呈边缘式扩展，在城市聚集效应下围绕原有城镇中心向外扩展延伸，表现为不规则扩散布局趋势，单个斑块面积增加为主（图 5）。主要是因为人口集聚带来社会生产生活需求的增加，城镇斑块的“繁殖效应”，满足产业园扩区升级增加的城市设施配套功能需求，如常德市 2001 年高新技术工业园建设与强化津市配套设施。2007—2011 年呈填充式扩展，聚集于斑块内部灯光强度灰度值增加，如 2008 年，荆州市人民政府发布禁止非法占地和违法建设的通知。表现为老城区“旧城改造”“棚户区改造”政策下，内部功能结构优化。2011—2017 年呈飞地式扩展，空间分布较为分散，基本跳脱现有斑块，转而依托国道、省道、水域等放射性交通轴向扩展，表现出明显导向性、通达性与规划性。2011 年湖南省人民政府《关于进一步加快水运发展的实施意见》；2013 年批复《常德港总体规划》；2014 年岳阳至宜昌高速公路石首至松滋段（S88）通车，多个政策和项目促进周围区域有效带动功能转移、土地转用、拓展区域发展框架，表明“交通引导开发”战略在区域的实施。

3.3 城市群区域扩展的重力主导方向

为进一步研究环洞庭湖生态经济区城市群时空扩展规律，绘制了城市群时空重心偏移图，把灯光强度灰度值一样的区域看作一个均质空间，求出均质空间的重心，重心平均灯光强度不一致，灯光强度越强离市中心城区越近。依据每个平均灯光强度不同灰度值像元构成，像元灰度值作为权重参与运算，计算出最终城市群区域重心。此时获得的重心不同于前人研究中简单的几何中心，重心移动空间规律可以更真实直观地反映在路线图 6 上。

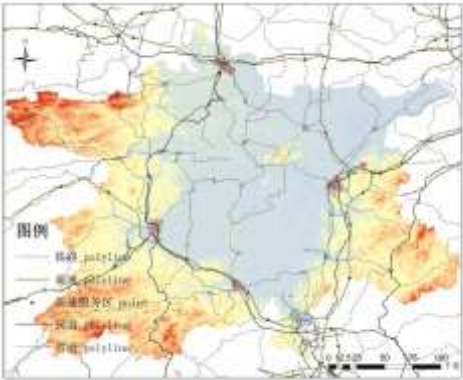


图 5 城市群区域交通图

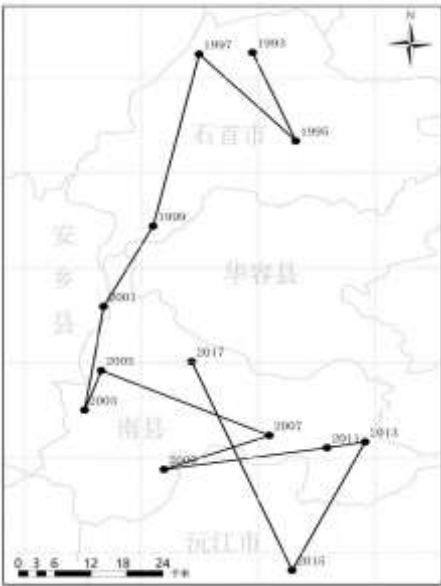


图 6 重心偏移位置图

用上述方式得到图 6，可以看出环洞庭湖生态经济区城市群的重心主要集中在中心偏东北部位置，随着年份推移，分别在石首市、安乡县、南县和沅江市之间移动，位于 $29^{\circ} 0' N \sim 29^{\circ} 50' N$, $112^{\circ} 10' E \sim 112^{\circ} 40' E$ 之间，重心由荆州市移动到益阳市，1993—2015 年重心一直向南移动，说明岳阳市、益阳市和望城区的发展较荆州市、常德市要迅速。但在 1997、2005 和 2017 年又跳跃式向北移动，常德市和荆州市在这三年发展较快。在东西方向上，约在 25' 的东西距离之间移动，1993—2003 年，重心一直向西移动到南县的最西端，说明在 2003 年之前，常德市和益阳市发展迅速，在 2003 年以后岳阳市和望城区加速发展，重心向东移动，在 2013 年移动到最东端。1993—1999 年，偏移速度和距离在增加，以比较高的速度在移动，达到 17046.69m/s，角度转变比较大，这段时间城市化发展迅速，城市扩展速度较快；1999—2005 年，移动距离和速度开始减缓，移动距离为 8028.15m，这段时间城市扩展的速度在减缓，可角度变换也比较小，说明城市在进行内部填充式发展；2005—2013 年城市重心偏移速度波动，在 2013 年达到了最低值，2688.92m/s 的速度， 12.79° 的偏移角度，这段时期城市群中各城市稳定发展，相对较平稳；2013—2017 年，城市群的重心偏移距离和速度达到了最高值 42859.38m，角度 109.66° ，说明这个时期，城市化和城市群扩展速度快。

经济和能源领域多用重心偏移分析^[17]，因此，研究城市群建成区不似以往，本文增加加权重心偏移分析，掌握区域经济发展动态，突出建成区扩展方向，观测未来发展。1997、2005 和 2017 年重心的三次跳跃性的移动可能是荆州市和常德市的经济发展的重心偏移。1996 年 12 月，恒安纸业有限公司——国内规模最大的卫生纸厂落户常德市；2005 年，开始建设武广铁路客运专线，总投资 930 亿元；2017 年常德市人民政府提出“降费减负”来促进工业企业发展。2003 年之前重心在最西端，2001 年常德市被评为全国优秀旅游城市，多个产业品种获得瑞士 IMO 国际认证有机茶认证；2003 年益阳市人民政府推出《益阳市城市资源经营管理暂行办法》。2003 年之后，重心向东端移动的原因可能是岳阳市 GDP 连续 14 年超过常德等城市；2013 年岳阳市印发《2013 年岳阳市发展开放型经济工作要点》，全市 GDP 达 2430 亿元，排名全省第四，超过第五的常德和第九的益阳。2017 年，岳阳市、常德市、益阳市、荆州市和望城区的 GDP 分别是 3258.03、3238.14、1665.41、1922 和 658.76 亿元，由于经济变化的原因，重心所处位置完全符合实际情况。

表 3 重心偏移数据表

时间	偏移距离(m)	偏移角度($^{\circ}$)	偏移速度(m/s)
1993—1995	18261.02	-70.21	9130.51
1995—1997	21556.88	128.87	10778.44
1997—1999	34093.37	-100.02	17046.69
1999—2001	17063.24	-113.01	8531.62
2001—2003	20286.00	-97.03	10143.00
2003—2005	8028.15	73.48	4014.08
2005—2007	26471.48	-27.74	13235.74
2007—2009	16007.88	-154.90	8003.94
2009—2011	22978.48	11.32	11489.24
2011—2013	5377.84	12.79	2688.92
2013—2015	26905.37	-111.33	13452.68
2015—2017	42859.38	109.66	21429.69

3.4 城市群区域扩展的景观格局形态特征

景观格局形态是将景观时间量度与空间结构相结合，反映生态系统配置、组成和构成，体现其空间分布规律与差异性。

斑块数量 (NP)，在一定程度上能反映城市群空间破碎化和空间形态连续性，同种类型的 NP 决定着人口动态和分布。从图 7 可以看出，NP 保持稳定低速上升，满足大多数城镇扩展规律。当 NP 增长到 2009 年时，这些斑块开始连通成片，NP 就开始下降。而 2015 年由于不同型号的卫星 (VIIRS/DNB 夜间灯光遥感数据) 采集的原因，其分辨率较之前卫星数据更高，所以 NP 明显增加 (后文中数据在 2015 年发生巨变是同原因)。景观面积 (TA) 决定了研究最大尺度分析范围，图 7 中 TA 在稳定的增加，体现生态系统稳定性上升，有城镇用地、中覆盖度草地、林地和其他建设用地斑块增加。景观形状指数 (LSI) 有圆形与方形两种参考，大体走势相近，在数值上有细小的差别，表征区域用地形态复杂度。当 LSI=1 时，形状是正方形或圆形，区域在 1995 年形状最规则，在 2001 年最为复杂。1993—2005 年形状逐渐复杂化，之后区域由“数量增长”过渡到“规模扩张”，城市群发展更加紧凑。

最大斑块占比 (LPI)，能决定景观优势和模地类型，反映人类活动干扰的强度与频率，丰富景观生态信息。由最大斑块面积 (MAX) 和最小斑块面积 (MIN)，初步了解到区域内城镇扩展状况，用地面积迅速扩展。最大斑块面积由 70.07km^2 扩大到 201.44km^2 ，最小斑块面积由 1.05km^2 缩小到 0.13km^2 ，LPI 值减少 0.23%。区域斑块面积两极分化严重，1993—2005 年，平均斑块面积下降至 22.28km^2 ，景观破碎化程度增加，2006—2017 年逐渐回升至 31.60km^2 ，景观破碎化程度有所下降 (图 8)。岳阳市和望城区在城市群发展过程中带动周边更加均质化，起到了辐射周围城镇的作用。

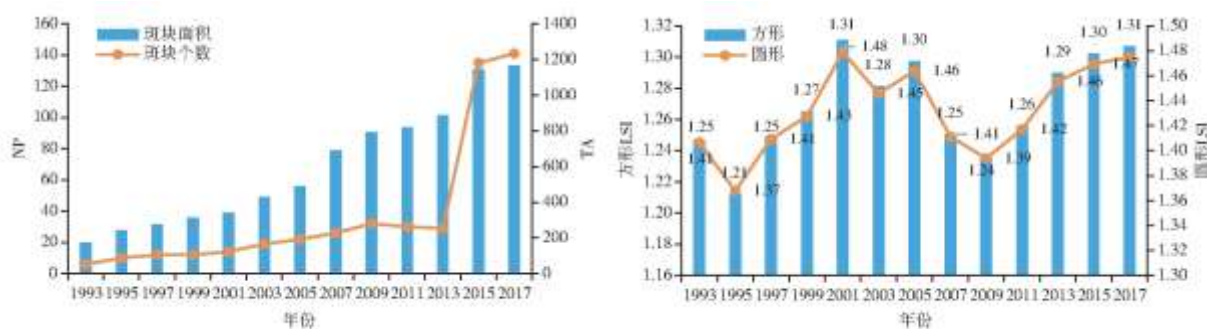


图 7 NP、TA、LSI 数据图 (1993—2017 年)

香农多样性指数 (SHDI)，对非均衡分布各斑块信息情况比较敏感，反映出斑块多样性与异质性。图 9 中 SHDI 在前几年保持平稳，在 2001—2017 年有些许波动，说明区域不定性的信息含量比较大，均衡化趋势分布先降低后上升，土地利用丰富，多样性增加。平均斑块分维数 (MPFD)，反映形状的复杂程度与人为干扰频率。图 9 显示，区域分维数趋近于 1，指数也在逐渐攀升，自相似性强，斑块空间形状较规则，形状复杂程度低，受人类活动干扰较小。斑块密度 (PD) 是景观破碎化程度的重要指标之一，图 9 中斑块密度小幅度多次升降最终呈下降趋势，表明区域破碎化程度降低。平均边界密度 (ED) 在上下波动中趋于平衡。

斑块多度密度 (PRD)，反映景观类型丰富度与多样性。PRD 随年份下降，表示滨湖地区分布集中，景观类型单元较少，连通性较弱。斑块面积方差 (PSSD)，随着年份逐渐增大，说明斑块大小差异逐渐增大。聚集度指数 (CONT)，反映城市化拓展速度及空间形态演变的重要指标。CONT 数值接近于 1，斑块形状趋于紧凑度最高圆形而非带状发展，数值曲线总体下降，斑块分散，城市处于迅速扩展阶段，斑块景观形状较简单，边界被割裂程度较低，连通性较低。CONT 在 2005—2009 年上升表明聚集度上升，城市转为内部填充发展阶段。蔓延度指数 (CONTAG)，和 CONT 表征城市群一体化程度，不同斑块类型的团聚程度或延展趋势，数值在 10~25 之间，存在一定的小斑块，具有多种要素的密集格局，连接性较差，景观的破碎化程度较高，城镇发展比较分散，一体化程度不明显 (图 10)。

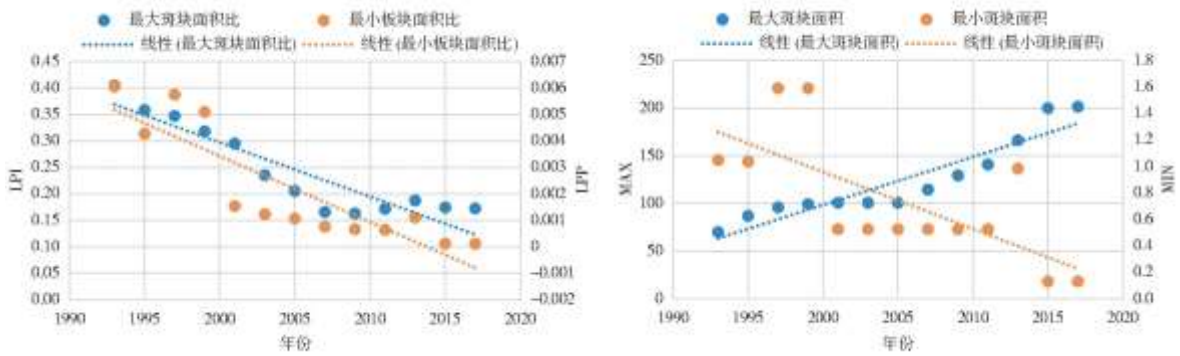


图 8 LPI、MAX、MIN 数据图（1993—2017 年）

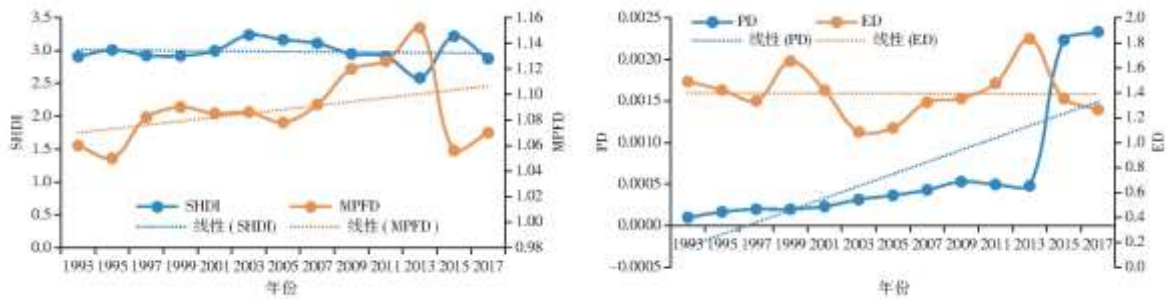


图 9 SHDI、MPFD、PD、ED 数据图（1993—2017 年）

分析洞庭湖生态经济区景观格局指数可以发现其形态特征，指数的波动与时空扩展的趋势贴合，随着扩展规模变化景观指数上下波动。整体来看，湖区景观土地利用类型丰富，多样性较高，斑块大小差异性大，复杂性高，形状较简单，多趋于圆形，景观破碎程度较高，区域连通性连续性较弱，布局较均匀，均衡性较好。蔓延度和聚集度指数表明城市群内各斑块相对独立，连通性和连续性较弱，是因为该区域地跨两省，由 4 市 1 区组成，所以区域内应加强联合，作为一个整体共谋发展。城市群是新型城镇化的主体空间，形成发展与时空扩展对生态环境造成了深远的影响，对湖区湿地生态系统影响更为明显。湖区城市群建成区扩展应充分考虑生态环境的脆弱敏感性和承载力，未来发展将面临更艰巨的生态环境保护任务^[18]。

4 城市群时空扩展演变规律的讨论

环洞庭湖生态经济区城市群与大部分城镇发展模式相近，城市群建设用地在研究期呈外延扩展态势，平均每年增长 47.92km²，面积增长率 574.58%，平均扩展强度 9.74。城市群城市体系规模增长时空演化呈现 1993—2001 年中速平稳扩展，城市群紧凑度升高；2001—2007 年高速蔓延边缘式扩展，紧凑度降低；2007—2013 年低速填充式扩展，紧凑度再次增加；2013—2017 年快速外延飞地式扩展，城市群空间紧凑度下降。发展逐步从数量增长转变为规模增长进而再转向数量增长的过程，呈周期性变化。城市群的时空扩展四个扩展过程或者更多的扩展过程为一个周期循环，单个过程 5 年左右。

1993—2003 年城市群重心向西南方向偏移（常德益阳方向），2003—2013 年后转向东南方向（岳阳望城区方向），2015 年继续向南（益阳望城区方向）偏移，2017 年向北（常德荆州方向）跳跃。区域建成区面积增长速度分别为常德市>岳阳市>荆州市>益阳市>望城区，常德市与岳阳市主导城市群快速发展。根据规划，岳阳将向西发展，荆州向南发展，常德向东发展，益阳和望城区向北发展，扩展方向为地势条件较好的地形交界处。

环洞庭湖生态经济区城市群景观格局形态指数表明城市之间相对独立，未形成规模城市群绵延区，呈空间扩散特征，分布连通性较弱。表现为以地市市区及周边高速扩展区与县域为核心，以其他县市域为边缘的“五核”空间扩展模式。主城区区域扩展方式以边缘式扩展为主，围绕原有中心以不规则圈层向外延伸，如岳阳楼区、荆州区与沙市区等；近年来飞地式扩展比重增加，沿区域交通要道、水域轴线延展趋势明显，如监利县、安乡县等。

洞庭湖生态经济区由于地形地势和生态形式的特殊性，不似其他城市群区域一体化（如长株潭城市群）的发展模式，更适合各城市独立发展的模式来保存和保持特有的湿地资源和物种多样性，但依然需要增强城市间的联系，打破省级界限，推进生态文明建设，构建现代产业体系等，更好地互利互惠。

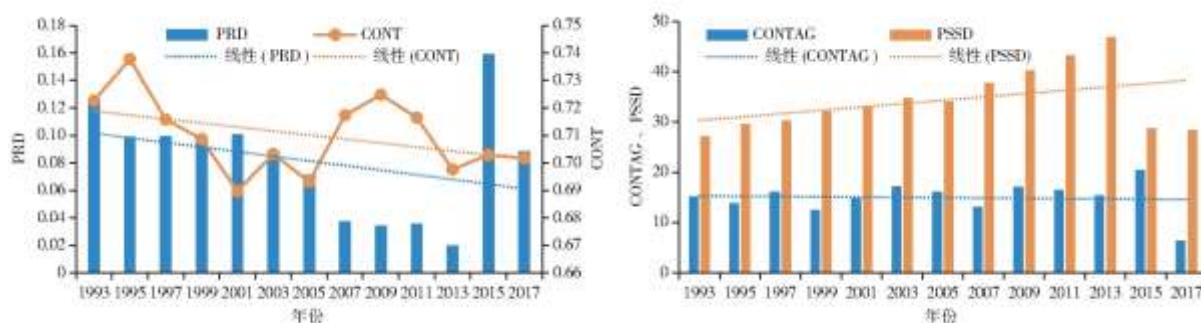


图 10 PRD、CONT、CONTAG、PSSD 数据图（1993—2017 年）

环洞庭湖生态经济区城市群地势结构的跨度大，水陆交通在区域发展中起到了关键作用。以岳阳市为例，区域水陆交通通达便捷，既有城陵矶港，又有京广铁路、京珠高速、武广高铁等重要交通干线穿行，因此岳阳市发展在区域前列。所以要重视区域水陆交通建设，形成交通网络系统，实现高速、国道、省道、县道以及乡道有机结合，加强区域内部各城镇之间的连通性，促进资源共享、共同发展。为了保护洞庭湖生态经济区生态环境资源，要以生态环境容量与水资源承载力来调控城市群的产业及人口规模，减轻因城市群扩展带来的生态环境压力，提升发展品质。环洞庭湖生态经济区城市群应积极向南北方向延伸，连接长株潭城市群和武汉城市圈，借“四水”连接三湘并与“长三角”和“珠三角”经济带相衔接，构筑“湖区发展，生态文明”的区域发展格局。

5 结论

环洞庭湖生态经济区城市群扩展经历中速调整过渡—高速边缘扩展—低速内部填充—快速飞地式扩展过程，呈现复杂周期性变化。城市群重心由荆州市石首市南移到益阳市南县内，1997—2003 年南北跨度最大，2003—2013 年东西跨度最大。城市均向重心方向扩展，地势条件较好的地形交界处扩展速度较快。城市群景观格局形态相对独立，呈“五核”空间模式扩展，呈扩散发展特征。由于区域地势地形的独特性，独立发展可能更适合区域资源的保存。依旧需要交通、基础设施等来打破地域阻隔，推进资源共享、经济互助、共同发展。

参考文献:

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319 (5864): 756-760.
- [2] Schoettker A B, Over M, Braun M, et al. Monitoring statewide urban development using multitemporal multisensoral

satellite data covering a 40year time span in north Rhine-Westphalia(Germany) [C]//Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics,2004.

[3]Yikalo H A.Urban land use change analysis and modelling:a case study of Setubal-Sesimbra,Portugal[J].Master of Science in Geospatial Technologies,2009,67(8):268-287.

[4]王翠平,王豪伟,李春明,等.基于DMSP/OLS影像的我国主要城市群空间扩张特征分析[J].生态学报,2012,32(3):942-954

[5]Kang W,Chuanglin F,Haibo H,et al.Comprehensive delimitation and ring identification on urban spatial radiation of regional central cities:case study of Zhengzhou[J].Journal of Urban Planning & Development,2013,139(4):258-273.

[6]Kerong S,Wei S,Jie F.Sequential city growth:Theory and evidence from the US[J].Journal of Geographical Sciences,2014,24(6):1161-1174.

[7]公维民,张志斌,王凯佳,等.基于夜间灯光数据的兰白西城市群空间扩展分析[J].资源开发与市场,2018,34(8):1048-1053.

[8]Zhuo Li,Weiguo Jiang,Wenjie Wang,et al.Exploring spatialtemporal change and gravity center movement of construction land in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(8):1363-1380.

[9]中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委关于印发洞庭湖生态经济区规划的通知[EB/OL].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201405/t20140512_964118.html,2014-05-02

[10]李俊峰,潘竟虎.基于夜间灯光的1992-2012年甘肃省城市空间扩展研究[J].冰川冻土,2016,38(3):829-835.

[11]舒松,余柏菡,吴健平,等.基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J].遥感技术与应用,2011,26(2):169-176.

[12]Bing T,Xiaofei Z,Xudong K,et al.Spatial density peak clustering for hyperspectral image classification with noisy labels[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2019,57(7):5085-5097.

[13]Bing T,Xianchang Y,Nanying L,et al.Hyperspectral anomaly detection via density peak clustering[J].Pattern Recognition Letters,2020,129:144-149.

[14]李颖,冯玉,彭飞,等.基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J].经济地理,2017,37(12):180-189.

[15]Cartier C.'Zone Fever',the arable land debate,and real estate speculation:China's evolving land use regime and its geographical contradictions[J].Journal of Contemporary China,2001,10(28):445-469.

[16]Bai X,Shi P,Liu Y.Society:Realizing China's urban dream[J].Nature,2014,509(7499):158-160.

[17]查凯丽,彭明军,刘艳芳,等. 武汉城市圈路网通达性与经济联系时空演变及关联分析[J]. 经济地理, 2017, 37(12):74-81, 210.

[18]方创琳,高倩,张小雷,等. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2019(9):1413-1424.