

DOI: 10.5846/stxb202007221918

李空明, 李春林, 曹建军, 王昊, 刘森, 吕久俊, 郝真. 基于景观生态学的辽宁中部城市群绿色基础设施 20 年时空格局演变. 生态学报, 2021, 41(21): 8408-8420.

Li K M, Li C L, Cao J J, Wang H, Liu M, Lü J J, Hao Z. Spatiotemporal evolution characteristics of urban green infrastructure in central Liaoning urban agglomeration during the past 20 years based on landscape ecology and morphology. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8408-8420.

基于景观生态学的辽宁中部城市群绿色基础设施 20 年时空格局演变

李空明^{1,2}, 李春林², 曹建军^{1,*}, 王 昊³, 刘 森², 吕久俊⁴, 郝 真⁵

1 西北师范大学, 地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016

3 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195

4 辽宁省生态环境保护科技中心, 沈阳 110016

5 日照市生态环境保护服务中心, 日照 276800

摘要:城市绿色基础设施(UGI)作为城市的重要生态屏障,是解决城市环境问题的重要途径。研究快速城市化背景下 UGI 的时空分布格局及形态演变,对优化城市绿色空间网络与布局、改善城市人居环境和提升城市可持续发展能力具有重要意义。利用谷歌地球引擎(GEE)平台计算了 2000—2019 年共约 4800 景 Landsat 影像的植被指数和水体指数,采用指数阈值分割方法,解译得到了辽宁中部城市群 20 年的 UGI。在此基础上,运用景观格局指数和形态学空间格局分析方法(MSPA),分析了 20 年(2000—2019 年)连续时间尺度上辽宁中部城市群 UGI 景观格局的演变趋势。结果表明,20 年间,辽宁中部城市群 UGI 面积呈波动上升趋势,由 2000 年的 170.28 km² 增长到 2019 年 275.68 km²,增幅达 62%,但由于持续的城市扩张,其占城市建成区面积的比例不断下降,由 2000 年的 25.73% 下降到 2019 年的 19.72%,表明城市绿地空间建设滞后于城市空间扩张。研究期内,城市群 UGI 景观破碎化程度加剧,优势景观斑块的主导性减弱,景观形态趋于不规整且复杂化,且在空间布局上更加分散,景观斑块之间的结合度变差。此外,UGI 核心区随城市扩张被逐渐蚕食,并转化为边缘区、桥接区、分支和环岛区等其他类型的 UGI 或非 UGI 景观,其占 UGI 总面积的比例从 2000 年的 46.2% 下降到 2019 年的 37.26%;城市边缘区 UGI 变化最为剧烈,更易受到城市扩张的影响。研究可为快速城市化区域 UGI 空间网络布局与优化和基于 UGI 的城市生态安全格局构建提供技术支撑和决策依据。

关键词:辽宁中部城市群;城市绿色基础设施;景观格局;形态学

Spatiotemporal evolution characteristics of urban green infrastructure in central Liaoning urban agglomeration during the past 20 years based on landscape ecology and morphology

LI Kongming^{1,2}, LI Chunlin², CAO Jianjun^{1,*}, WANG Hao³, LIU Miao², LÜ Jiuju⁴, HAO Zhen⁵

1 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Piesat Information Technology Company Limited, Beijing 100195, China

4 Liaoning Science and Technology Center for Ecological and Environmental Protection, Shenyang 110016, China

5 Rizhao Service Center for Ecological and Environmental Protection, Rizhao 276800, China

基金项目:国家自然科学基金(41871192,41730647,41771200);中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室开放基金(KLEIRB-ZS-16-01)

收稿日期:2020-07-22; **网络出版日期:**2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caojj@nwnu.edu.cn

Abstract: Urban green infrastructure (UGI), serving as the essentially ecological barrier of cities, is an important way to solve urban environmental problems. It is of great significance to study the spatiotemporal pattern and morphological evolution of UGI in rapidly urbanizing area for optimizing the network and layout of urban green space, improving the urban living environment and enhancing the city's sustainable development capacity. Using the Google Earth Engine (GEE) platform, the vegetation index and water index of about 4,800 Landsat images from 2000 to 2019 were calculated, then the UGI of central Liaoning urban agglomeration was extracted by using the index threshold method in this study. On this basis, using the landscape metrics and the morphological spatial pattern analysis (MSPA), a continuous time series analysis was further conducted to explore the evolution trends of the UGI landscape pattern in central Liaoning urban agglomeration from 2000 to 2019. The results indicated that the UGI area of central Liaoning urban agglomeration showed an upward trend, increasing by 62%, from 170.28 km² in 2000 to 275.68 km² in 2019. Due to continuous urban expansion, its proportion of urban built-up area declined gradually from 25.73% in 2000 to 19.72% in 2019, indicating that urban green space construction lagged behind urban expansion. During the study period, fragmentation of the UGI in this urban agglomeration intensified, the dominant patches' area decreased, the patches' shape tended to be unconscionable and diverse, the UGI landscape became spatially dispersed and patches cohesion of UGI decreased. In addition, the UGI was gradually encroached on and transferred to other types of UGI, such as edge, bridge areas, branches and loop, or non-UGI landscape with the urban area expansion, its proportion in UGI decreasing from 46.2% in 2000 to 37.26% in 2019; the UGI in urban's margin changed more intensively and was more affected by the urbanization process. This research can provide technical and decision-making supports for the layout and optimization of UGI network in rapidly urbanizing areas and the construction of UGI-based urban ecological security pattern.

Key Words: central Liaoning urban agglomeration; urban green infrastructure; landscape pattern; morphology

改革开放以来,我国城市化进程不断加快^[1]。快速城市化导致城市内部生态用地破碎化、景观连通性降低,极大削弱了生态空间的生态系统服务功能,导致并加剧了一系列城市环境问题,如城市内涝^[2-3]、水体污染^[4-5]、空气污染^[6-7]、热岛效应^[8-10]和生物多样性减少^[11-12]等,进而严重威胁城市的可持续发展。近年来,以自然生命系统为支撑的城市绿色基础设施(UGI)受到学术界的广泛关注^[8, 13-14]。UGI指城市内部及其周边具有生态系统功能的自然、半自然开放性空间,及其相互连接而构成的绿色空间网络^[15],是城市绿色生态空间发展到高级阶段的产物^[16]。相比城市绿地空间、生态用地和生态空间,UGI的概念内涵与外延更丰富,且功能更全面,构成要素更加多样^[16]。UGI能够提供广泛和全面的生态系统服务,缓解日益严重的城市化问题^[17-19],被视为改善城市环境、维护城市生态安全的重要途径。研究快速城市化背景下UGI时空分布格局及形态演变,对于优化城市绿色空间网络,改善城市人居环境具有重要意义。

目前,关于UGI时空格局演化的国内外研究主要涵盖了不同时空尺度上UGI景观构成及形态^[20-23]、UGI网络构建与优化^[23-26],UGI景观格局变化的环境效应及其对生态系统服务的影响^[17-18, 27-31]等内容。在方法上,以遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术为支撑的景观格局指数分析与形态学空间格局分析(Morphological spatial pattern analysis, MSPA)的运用最为广泛。景观格局指数是量化景观格局变化的传统经典方法,被较早地应用到UGI时空格局演变的研究之中^[32-33]。景观格局指数能从景观面积边缘特性、形态复杂性、空间聚散性和类型多样性等多个方面有效量化UGI景观格局的时空变化^[21],但无法识别不同形态与结构的UGI类型及其变化状况。近年来,MSPA方法受到关注并开始被运用于UGI时空格局变化与网络构建的研究之中^[20]。MSPA是一种基于数学形态学原理对栅格数据进行量化、识别、分割的数字图像处理方法^[34-35],可将UGI景观分为核心区、环岛区、孤岛区、桥接区、孔隙、边缘区和分支等7种互不重叠且具有不同生态学意义的景观类型^[20]。与传统景观格局指数相比,MSPA方法能准确识别UGI的类型组分和结构特征,并反映UGI网络中的物质流、信息流和功能流^[36-37],因而在UGI景观形态变化的相关研究中表现出了较强的

适用性^[38]。此外,在运用 MSPA 方法识别 UGI 要素的基础上,结合景观连通性分析,可进一步进行城市生态廊道的构建及 UGI 网络的优化,这对基于 UGI 网络的城市生态安全格局构建具有重要意义和价值^[24, 36]。

RS 和 GIS 是研究城市景观格局和环境变化的重要技术手段^[7]。传统的 RS 平台对计算机软硬件要求较高,数据解译和分析工作量较大。受限于此,以前有关 UGI 景观格局的研究多集中于单一时间尺度上的 UGI 网络构建、或者不同时间断面上 UGI 的时空格局差异分析,缺乏长时间尺度上连续时间序列的 UGI 时空格局演变分析。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)是集地理信息数据获取、处理与分析于一体的云数据处理平台,基于 Java 或 Python 语言对数据进行在线调用和处理分析,对计算机软硬件要求较低且工作量较小,自其开发以来就得到了广泛运用^[39]。GEE 平台为连续时间尺度上的 UGI 时空格局变化研究提供了更好的技术支撑。

本文以快速城市化的辽宁中部城市群为研究对象,基于 GEE 大数据平台,运用传统经典景观格局指数分析方法和目前较为流行的 MSPA 方法探讨近 20 年间连续时间序列上的 UGI 时空格局演变趋势及城市群内部各城市 UGI 变化差异。研究旨在揭示快速城市化背景下 UGI 时空格局演变的一般规律并弥补连续时间序列的 UGI 时空格局分析较少的不足,进而为典型城市化区域 UGI 空间网络布局与优化和基于 UGI 的城市生态安全格局构建提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

辽宁中部城市群位于辽宁省中北部地区,包括了沈阳、鞍山、抚顺、铁岭、营口、盘锦、本溪和辽阳 8 个城市(图 1),是我国工业化和城市化进程较快的地区之一,也是环渤海经济带的重要组成部分^[40-41]。该地区属温带季风气候区,年均降水 500—800 mm,年均气温在 5—10℃ 之间。近年来,快速城市化使该地区城市景观和土地利用发生剧烈变化,城市环境也受到一定程度的破坏。

1.2 城市边界及 UGI 提取

本研究中,UGI 主要包括城市内部的绿色开放空间,如公园、绿化带等植被覆盖区以及河流、湖泊等城市水体。基于 GEE 平台,运用空间分辨率为 30 m 的 Landsat 5、7 和 8 影像提取了 2000—2019 年辽宁中部城市群 UGI 和城市边界,并利用谷歌高分辨率历史影像对结果进行了精度评价。具体过程为:首先,在 GEE 平台获取了 Landsat 5 TM(2000—2012 年)、Landsat 7 ETM(2013 年)和 Landsat 8 OLI(2014—2019 年)影像共约 4800 景,去云处理后计算归一化植被指数(NDVI)和修正归一化水体指数(MNDWI),采用最大值合成和平均值合成法得到年最大 NDVI 和年平均 MNDWI;然后,运用三次滑动平均法^[42]对年最大 NDVI 和年均 MNDWI 进行了平滑处理,重构时间序列上的 NDVI 和 MNDWI 数据,以降低噪声的影响;最后,参考已有的分类方法^[13, 43],运用年最大 NDVI 和年均 MNDWI 阈值法划分出绿地、水体和其他区域等三个地类。此外,结合谷歌高分辨率历史影像进行目视解译,提取 2000—2019 年各城市边界,以此作为掩模对分类结果进行矢量裁剪。



图 1 辽宁中部城市群位置

Fig.1 The location of central Liaoning urban agglomeration

1.3 UGI 景观格局指数分析

景观格局指数是衡量景观格局变化的有效方法,但由于其类型复杂多样,合理选择景观格局指数对科学分析景观格局就显得非常重要^[44-45]。为全面分析辽宁中部城市群 UGI 景观格局变化,本文从面积边缘、景观形态、聚散性 3 个方面选取了斑块密度(PD)、最大斑块面积占景观总面积比例(LPI)、景观形态指数(LSI)、面积加权平均形状指数(AWMSI)、聚集度指数(AI)以及结合度指数(COHESION)6 个指标量化分析其时空格局演变。运用 FRAGSTATS 4.2 软件计算各景观指数,各指数计算公式和生态学意义参见文献^[46]。

1.4 UGI 形态学空间格局分析

运用 MSPA 方法分析 UGI 景观形态特征变化。首先,将绿地和水体合并作为 UGI 要素,并作为前景像元,设置像元值为 2,以不透水区域和其他区域为背景像元,设置像元值为 1,形成新的二值 TIFF 格式栅格数据。然后,将其导入 Guidos Tool Box 软件,采用八邻域规则,设置边缘宽度为 1,进行 MSPA 分析,最终将 UGI 分为互不重叠的 7 个景观类型(表 1)。

表 1 MSPA 景观类型及其生态学含义^[34]
Table 1 MSPA class and their ecological implications

景观类型 Landscape class	生态学含义 Ecological implications
核心区 Core	前景像元中较大的斑块,可为物种提供较大的栖息地,对生物多样性的保护具有重要意义,是生态网络中的生态源地
孤岛区 Islet	彼此不相连的孤立、破碎小斑块,斑块之间的连接度比较低,内部物质、能量交换和传递的可能性比较小
孔隙 Perforation	核心区和非绿色景观斑块之间的过渡区域,即内部斑块边缘
边缘区 Edge	核心区 and 主要非绿色景观区域之间的过渡区域
桥接区 Bridge	连通核心区的狭长区域,代表生态网络中斑块连接的廊道,对生物迁移和景观连接具有重要意义
环岛区 Loop	连接同一核心区的廊道,是同一核心区内物种迁移的通道
分支 Branch	一端与边缘区、桥接区、环道区或者孔隙相连的区域

2 结果与分析

2.1 UGI 解译结果与精度评价

在参考已有研究成果^[13, 43]的基础上,为年最大 NDVI 和年均 MNDWI 设定初始阈值,然后不断调试阈值大小,并利用谷歌高分辨率历史影像对各阈值组合的解译结果逐一进行精度验证,在 UGI 分类总体精度大于 90%的情况下,最终确定本研究区的年最大 NDVI 和年均 MNDWI 划分阈值分别为 0.45 和 0.25。

2000—2019 年,辽宁中部城市群城市绿地和水体面积总体上呈增长趋势,其中城市绿地从 2000 年的 161.46 km²增长到 2019 年的 249.89 km²,增幅达 54.77%;城市水体面积增长近 2 倍,从 2000 年的 8.83 km²增长到 2019 年的 25.79 km²(图 2)。除沈阳外,各城市绿地和水体均呈增长趋势。其中,抚顺的城市绿地面积增幅最大,从 2000 年 7.82 km²增长到 2019 年的 32.73 km²,增加约 3 倍;辽阳的水体面积增幅最大,由 2000 年的 0.012 km²增长到 2019 年的 1.67 km²。近 20 年,各城市水体面积虽然总体呈增加趋势,且增幅较大,但其占 UGI 面积的平均比例较小,均在 10%以下(图 2)。

2000—2019 年,辽宁中部城市群 UGI 总面积总体呈增长趋势,由 2000 年的 170.28 km²增长到 2019 年的 275.68 km²,增幅达 62%,但其占城市建成区比例在不断下降,由 25.73%下降到 19.72%(图 3),表明城市群 UGI 增长总体滞后于城市扩张,城市绿化状况变差。从各城市的 UGI 面积变化看,研究期内,除沈阳市外,城市群其余 7 个城市 UGI 面积均呈波动增加趋势,其中抚顺的 UGI 面积从 2000 年的 9.46 km²增加到 2019 年的 37.26 km²,增加近 3 倍。从 UGI 占城市面积比例变化看,盘锦、沈阳和营口三个城市的 UGI 占比总体呈下降趋势,其中沈阳市的降幅最大,由 2000 年的 31.95%下降到 2019 年的 18.69%;鞍山、抚顺、铁岭的 UGI 占比呈微弱地波动上升趋势,而本溪和辽阳的 UGI 占比整体上变化不大。分阶段看,2008 年前后,城市群 UGI 面积及其占比变化存在差异。2000—2008 年间,城市群整体及各城市 UGI 面积均存在显著的增加趋势,且 UGI 占

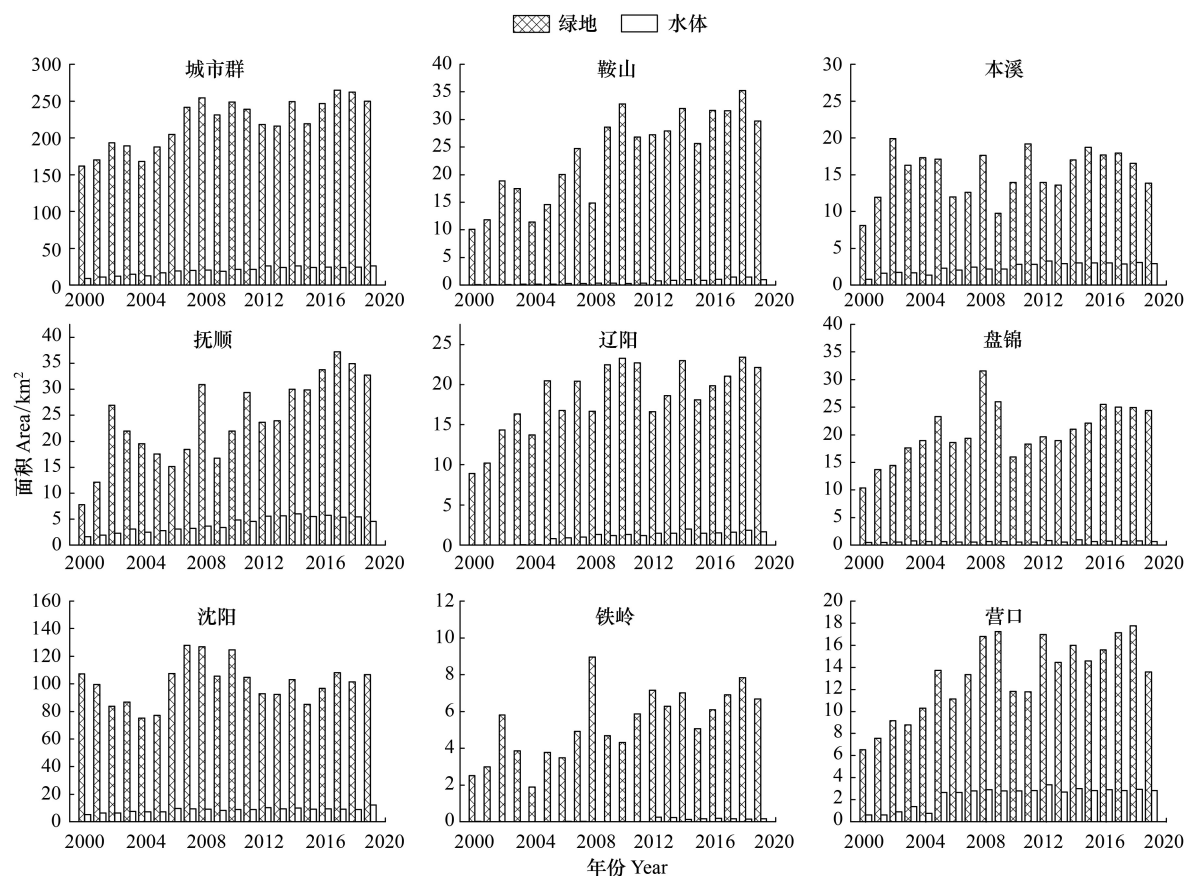


图2 2000—2019年辽宁中部城市群城市绿地和水体面积变化

Fig.2 Urban green land and water area changes in central Liaoning urban agglomeration from 2000 to 2019

城市面积比例经历了较大波动。2008年以后,UGI面积及其占比变化较为平缓,总体变化不大(图3)。

2.2 UGI景观格局指数特征

2000—2019年,辽宁中部城市群UGI景观格局指数发生了显著变化(图4)。从面积边缘特征看(图4),城市群总体及内部各城市PD指数呈显著增大趋势,而LPI指数呈显著减小趋势,这表明城市群内部UGI景观斑块数量增多且优势斑块的主导性减弱,同时UGI斑块边缘长度增加,UGI景观趋于破碎化。从景观形态特征看(图4),研究期内城市群及各城市的LSI指数呈显著升高趋势,而AWMSI指数则呈显著下降趋势,表明城市群及各城市UGI景观形态复杂度增大,景观斑块趋于不规则化。从景观聚散性特征看(图4),AI和COHESION指数均呈显著下降趋势,表明城市群UGI在空间上呈逐渐分散的分布特征,景观斑块聚集性和结合度都降低。

2000—2019年各城市UGI各类景观格局指数随时间变化的回归分析结果如表2所示。从斑块面积边缘特征看,鞍山和辽阳的PD和LPI指数变化不显著,说明两城市UGI斑块数量和主导型斑块面积在该时期基本稳定;本溪、抚顺、铁岭和营口的PD指数显著增加,但LPI指数变化不明显,说明这四个城市的UGI斑块数量显著增加,但主导型斑块的面积未发生明显变化;抚顺的LPI指数显著下降,但PD指数变化不显著,表明该市UGI主导性斑块的面积占比减少,但斑块数量未明显增加;沈阳市UGI的PD指数显著增加且LPI指数显著下降,表明沈阳UGI板块数量增加,而主导性斑块的面积占比下降。从景观形态复杂度看,8个城市LSI指数都显著上升,表明所有城市的UGI形态复杂度趋于增加;此外,沈阳的AWMSI指数显著下降,表明该市UGI景观形态复杂化,且各斑块规模大小趋于均衡。从景观集聚度和结合度看,鞍山、抚顺、铁岭、辽阳和营口等城市的AI和COHESION指数变化不显著,表明这些城市UGI景观在空间上的分布未发生明显变化;本溪、

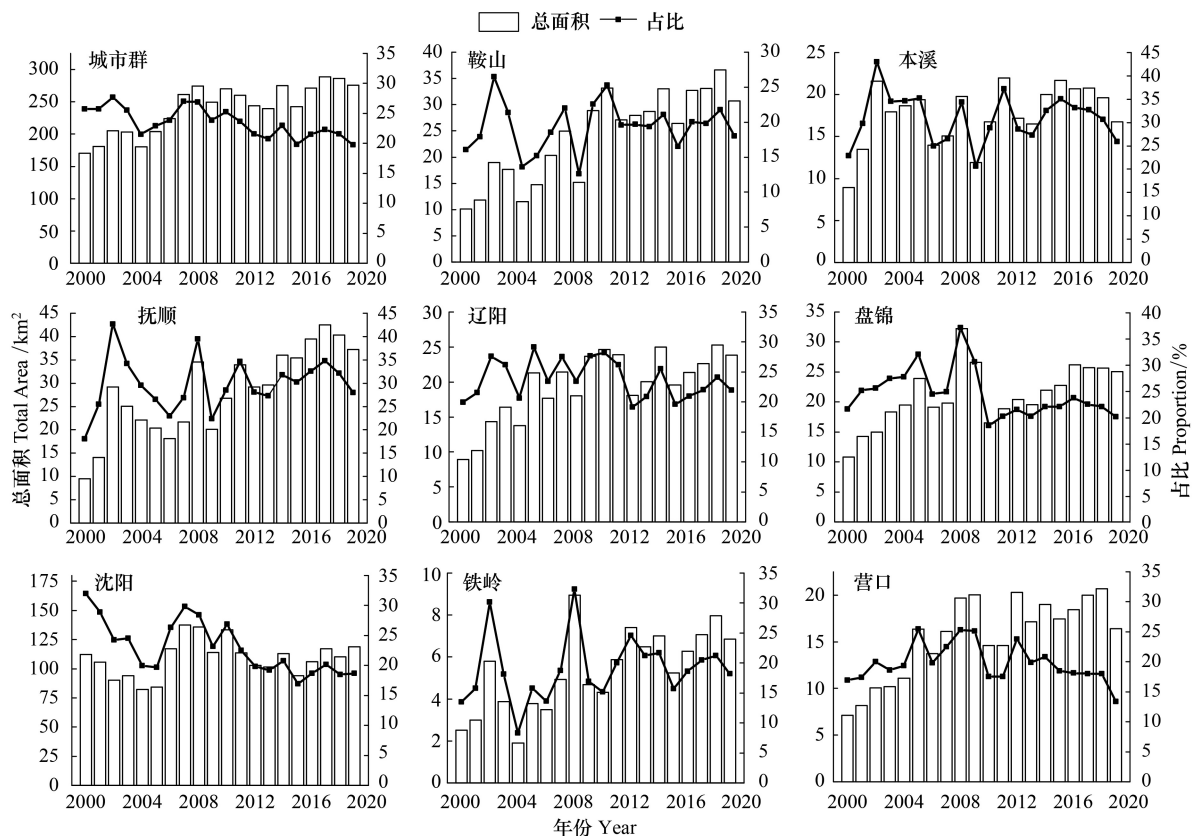


图 3 2000—2019 年辽宁中部城市群 UGI 面积及占城区总面积比例变化

Fig.3 UGI area and it's proportions of the total built-up area in central Liaoning urban agglomeration from 2000 to 2019

盘锦和沈阳三个城市的 AI 和 COHESION 指数均呈显著下降趋势,说明这三个城市 UGI 景观在空间上的分布趋于分散,斑块间连接性下降。

2.3 UGI 形态学空间格局特征

基于 MSPA 方法,辽宁中部城市群 UGI 被划分为 7 种类型(图 5)。从各景观类型的比例构成看,在城市群尺度上,2000—2019 年核心区占比最大,20 年平均占比为 40.97%,是占据绝对优势地位的 UGI 景观类型,其次为边缘区(28.63%)、孤岛区(10.79%)和分支(10.54%),而孔隙的占比最小,约为 0.76%(图 5)。在市域尺度上,研究期内本溪、抚顺、盘锦、沈阳及营口等多数城市的 UGI 景观比例构成与城市群整体保持基本一致,核心区是具有绝对优势的景观类型,各年份占比均在 30%以上,边缘区占比在各年份均达 20%,是仅次于核心区的主要景观类型,而其他类型占比较小,各年份累计占比均低于 50%;鞍山、辽阳、铁岭的核心区占比在部分年份略低于其他景观类型,但研究期内总体上仍是绝对的优势景观类型,各个年份核心区和边缘区的占比均在 50%以上(图 5)。

从各景观类型占比的时间变化趋势看,研究期内城市群整体核心区占比不断下降,从 2000 年的 46.2%下降到 2019 年的 37.26%;而孤岛区、边缘区,其中孤岛区占比从 2000 年的 5.56%增加到 2019 年的 13.57%,表明核心区的主导地位和优势度不断下降,各类景观类型比例趋于均衡化(图 5)。在市域尺度上,研究期内鞍山、沈阳 UGI 核心区比例总体呈下降趋势,其中沈阳从 2000 年的 52.46%下降到 2019 年的 38.86%,下降趋势最明显,其他景观类型的占比则呈不同程度的上升趋势,表明核心区逐渐转化为了其他景观类型;盘锦和营口 UGI 核心区占比在此期间经历了先增后减的变化过程,其占比自 2000 年开始逐渐增加,在 2008 年分别达到 57.65%和 48.37%的最大值,随后开始下降,而孤岛区和分支则呈先增后减的变化趋势,这表明 UGI 景观主要在核心区、孤岛区和分支之间转化;辽阳 UGI 核心区占比从 2000 年的 29.65%上升到 2019 年的 35.68%,而边

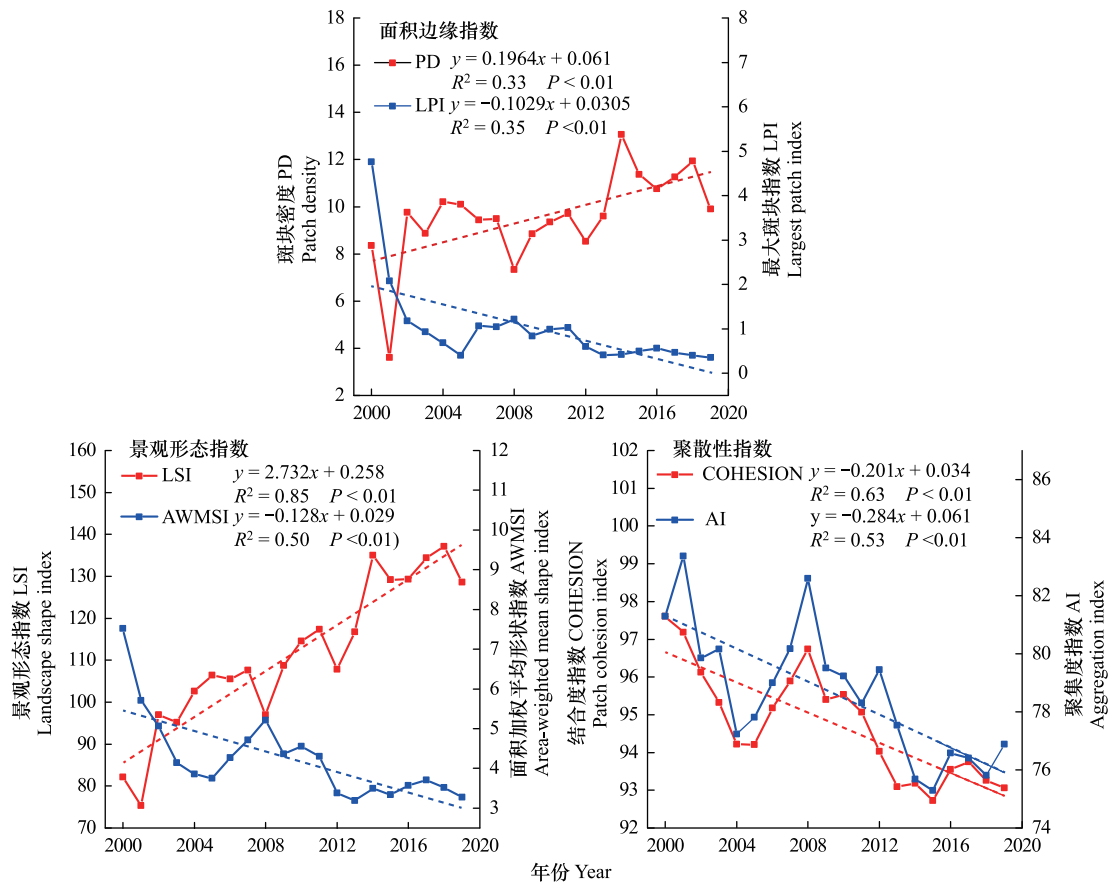


图4 2000—2019年辽宁中部城市群UGI景观格局指数变化

Fig.4 Landscape metrics changes of UGI in central Liaoning urban agglomeration from 2000 to 2019

缘区占比则从32.42%下降到28.31%,其他类型占比变化不大;铁岭、本溪以及抚顺的UGI各景观类型占比在该时期变化趋势不明显,均在一定数值范围内上下波动,其中铁岭UGI核心区和孤岛区占比的年度变化相对剧烈(图5)。

城市边缘区是UGI变化较为剧烈的区域。随着城市化进程,城市边缘向外围扩张,部分城市原城市边缘区的UGI逐渐成为城市内部景观,其核心区逐渐被蚕食并转化为其他UGI类型或非UGI区域,核心区斑块面积减少,斑块数量增多,景观趋于破碎化,其中以沈阳、盘锦和营口等城市较为典型。也有部分城市的边缘区UGI面积呈增加趋势,但新增的UGI景观破碎化程度较高,如抚顺、铁岭、本溪和辽阳等(图6)。

3 讨论

3.1 UGI景观格局变化

UGI是城市重要的生态屏障,其对城市环境改善具有重要的作用。大量研究表明,城市森林、草地、湖泊、河流和湿地等在内的UGI能够有效吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气污染物^[28, 30]、减少地表径流以缓解城市内涝^[2, 47]、固碳释氧^[17]以及缓解热岛效应^[9],此外还能够改善人体健康^[48-49]以及提供休闲娱乐场所^[50]。UGI景观格局变化影响着其生态系统服务的发挥,从而影响着城市环境质量。

景观格局指数揭示了辽宁中部城市群UGI时空格局的演变过程及规律。分析结果表明,近20年来,随着城市化进程的加快,辽宁中部城市群UGI景观整体趋于破碎化,优势景观斑块的主导性减弱,景观形态趋于不规整、复杂度增加,在空间分布上更加分散,景观斑块之间的结合度变差。这与陈康林等^[45]对1979—2014年间广州市绿色空间景观格局变化的研究结果一致,表明快速城市化背景下人类活动对城市自然生态系统的

表 2 2000—2019 年各城市的 UGI 景观格局指数变化

城市 City	景观指数 Landscape index	回归系数 Regression coefficients	标准误差 Standard error	P	R ²	城市 City	景观指数 Landscape index	回归系数 Regression coefficients	标准误差 Standard error	P	R ²
鞍山	PD	0.09	0.078	0.265	0.068	本溪	PD	0.41	0.108	0.001	0.444
	LPI	-0.05	0.044	0.268	0.068		LPI	-0.18	0.196	0.084	0.157
	LSI	1.241	0.141	0	0.812		LSI	0.511	0.09	0	0.641
	AWMSI	0.018	0.026	0.51	0.024		AWMSI	-0.08	0.041	0.055	0.189
	AI	-0.09	0.075	0.248	0.073		AI	-0.17	0.077	0.044	0.207
抚顺	COHESION	0.038	0.077	0.63	0.013	辽阳	COHESION	-0.02	0.061	0.036	0.119
	PD	0.261	0.063	0.005	0.362		PD	0.07	0.082	0.401	0.039
	LPI	-0.15	0.106	0.165	0.104		LPI	-0.04	0.033	0.306	0.058
	LSI	0.937	0.074	0	0.899		LSI	0.603	0.123	0	0.571
	AWMSI	-0.02	0.057	0.705	0.008		AWMSI	-0.01	0.019	0.987	0.0001
盘锦	AI	0.011	0.081	0.894	0.001	沈阳	AI	0.042	0.064	0.517	0.024
	COHESION	0.033	0.06	0.594	0.016		COHESION	0.021	0.064	0.751	0.006
	PD	0.143	0.079	0.087	0.154		PD	0.225	0.06	0.001	0.443
	LPI	-0.16	0.066	0.032	0.231		LPI	-0.19	0.057	0.004	0.38
	LSI	0.794	0.081	0	0.841		LSI	1.679	0.194	0	0.805
铁岭	AWMSI	-0.04	0.02	0.062	0.18	营口	AWMSI	-0.18	0.053	0.003	0.401
	AI	-0.23	0.078	0.008	0.331		AI	-0.42	0.086	0	0.57
	COHESION	-0.16	0.149	0.004	0.383		COHESION	-0.24	0.053	0	0.525
	PD	0.189	0.073	0.018	0.272		PD	0.114	0.05	0.035	0.225
	LPI	0.048	0.058	0.427	0.035		LPI	0.021	0.04	0.608	0.015
	LSI	0.426	0.045	0	0.834		LSI	0.728	0.07	0	0.859
	AWMSI	0.037	0.023	0.126	0.125		AWMSI	-0.02	0.012	0.063	0.179
	AI	0.116	0.151	0.454	0.032		AI	-0.06	0.108	0.606	0.015
	COHESION	0.236	0.144	0.12	0.129		COHESION	-0.09	0.063	0.163	0.106

PD: 斑块密度; LPI: 最大斑块面积占景观总面积比例; LSI: 景观形态指数; AWMSI: 面积加权平均形状指数; AI: 聚集度指数

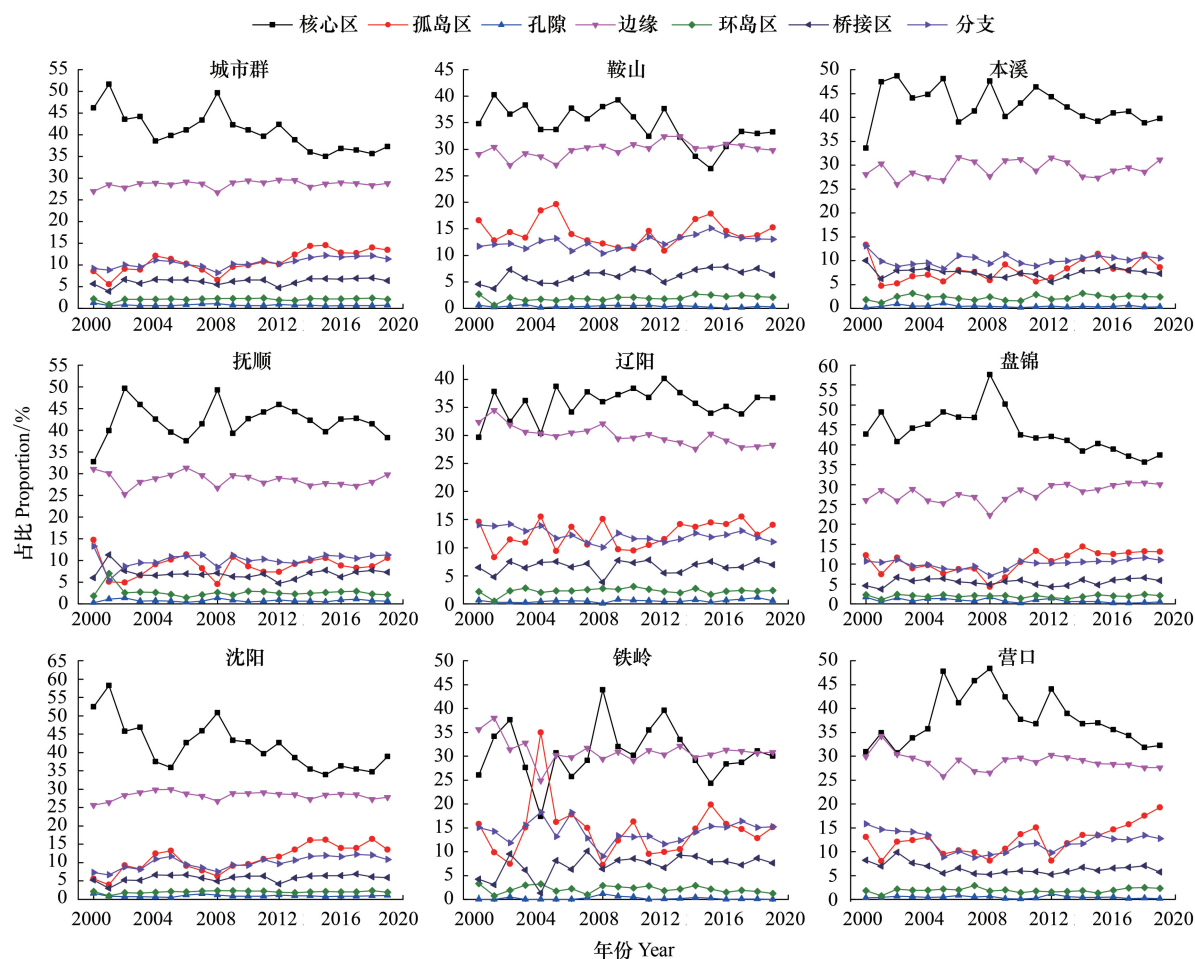


图5 2000—2019年辽宁中部城市群UGI景观类型比例构成变化

Fig.5 Proportion changes of landscape class of the UGI in central Liaoning urban agglomeration from 2000 to 2019

干扰强度增大,建设用地和交通网络扩张侵占了生态用地^[41, 51]。此外,各城市的UGI景观格局变化过程存在差异,但总体上都趋于破碎化,景观形态也趋于复杂化。其中,沈阳市UGI的景观格局变化的强度与速度明显高于城市群的其他城市。作为城市群的中心城市,沈阳市城市化进程较快、水平较高,市内道路交通网络密集程度和各项建设用地扩张强度较大^[51-52],因此UGI斑块更为细碎。UGI景观破碎化是导致城市生态空间的生态系统服务质量下降和城市内涝、空气质量降低以及热岛效应增强等一系列城市环境问题的重要因素之一^[2, 13, 28]。不过,有研究发现,破碎化的UGI斑块可使景观边缘效应增强,并创造出更加多样化的微生境,在特定条件下,这可能有利于城市生物多样性的提升和保护^[44]。

MSPA方法从形态学的角度深化了对UGI景观格局的时空演变分析,进一步揭示了UGI景观形态随城市化扩张的演化趋势。本研究的MSPA分析结果表明,2000—2019年间,无论是在城市群整体尺度,还是在市域尺度上,核心区均是该地区UGI的优势景观类型,但其占总景观面积的比例持续减少,主导地位不断削弱,其斑块也趋于破碎化,这与景观格局指数分析结果一致,与该地区在这一时期的快速城市化进程有关^[41, 52]。于亚平等^[21]的研究同样表明,20世纪80年代以来,随着城市化扩张,南京市UGI核心区面积减少,其主导地位下降,UGI景观趋于破碎化。核心区的破碎化意味着为动植物生长繁衍提供场所的生态源地在减少,但随着更多的核心区被分解为边缘区、桥接区和分支,UGI网络的连通性和边缘效应得以增强,为不同生物在不同生境间的迁徙提供了途径,反而有利于城市物种多样性的保护和提升^[21, 24-25]。本研究还表明,城市边缘的UGI网络更易受到城市化进程的影响,而内部老城区UGI得到了较好的保护。随着城市化不断向外扩张,原

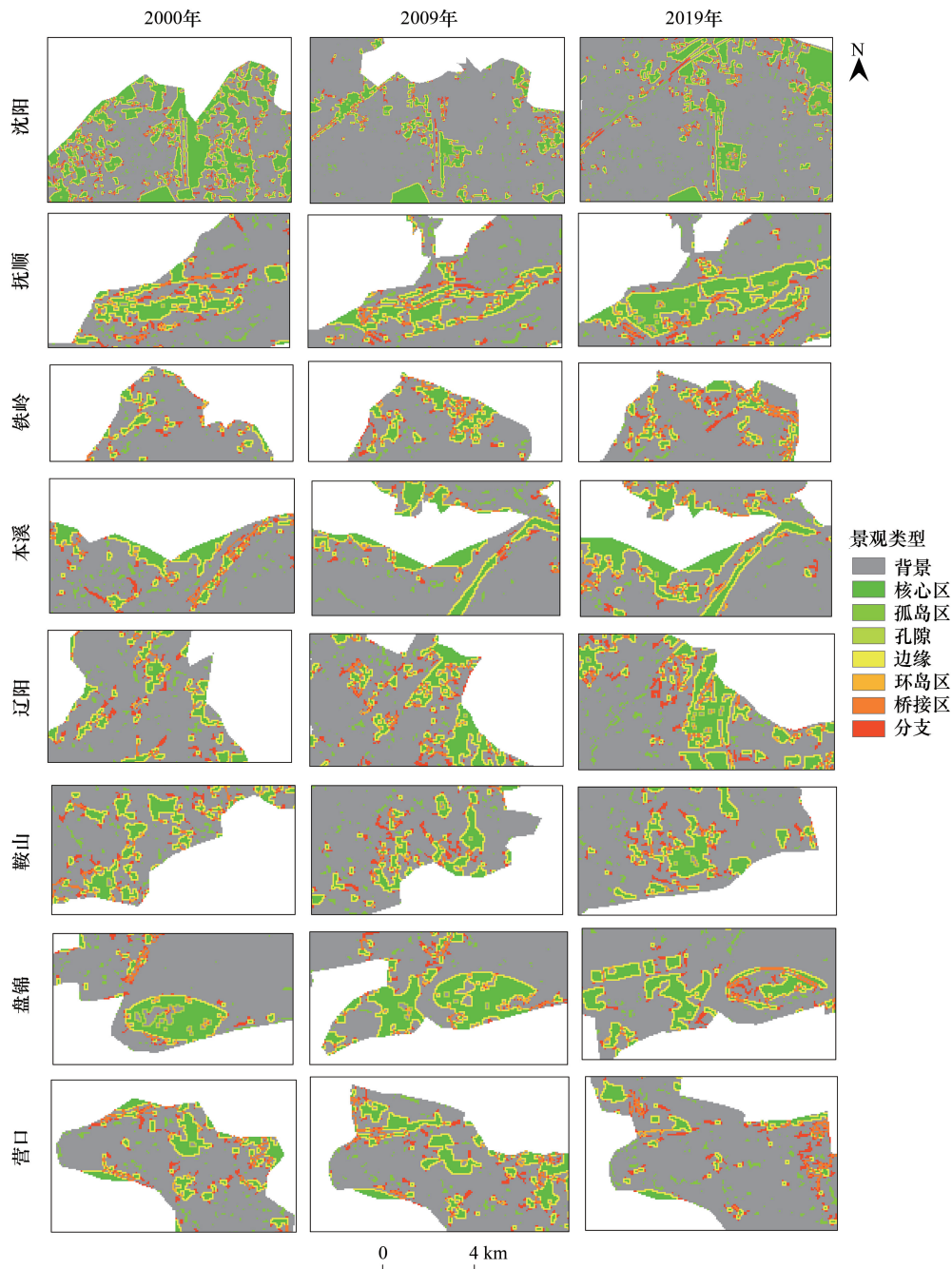


图 6 2000—2019 年各城市边缘区 UGI 景观形态特征演化

Fig.6 Changes of morphological pattern of UGI landscape in urban fringe from 2000 to 2019

城市边缘区的 UGI 逐渐被蚕食,并被非 UGI 景观所占据而趋于破碎化。与此同时,在新的城市边缘区会形成新的 UGI 网络,这一过程随着城市化不断向外围扩张周而复始,这同样与于亚平等^[21]的研究结果一致。

以上分析表明,快速城市化背景下 UGI 景观格局演变的一般特征为:城市化扩张侵占了大量的 UGI 空间,并导致核心 UGI 斑块的破碎化、离散化,斑块间结合性变差。因此,在后续的城市规划当中,各城市需要进一步探寻发展与生态保护的平衡点,设定刚性的生态空间将城市内部的核心生态源地加以保护^[53]。当然,UGI 景观的破碎化、离散化对其所提供的生态系统服务的利弊影响还有待深入研究。此外,相较于传统景观格局指数,MSPA 方法进一步量化了辽宁中部城市群 UGI 景观形态特征和空间位置变化^[20],为进一步构建城

市群生态廊道和完善城市群 UGI 网络奠定了基础,也为基于 MSPA 方法的城市化区域 UGI 景观格局演变的研究提供了案例参考^[24, 36]。

3.2 UGI 变化的时空差异性特征

UGI 是城市化进程的产物,其空间分布格局及演化是城市社会经济发展、城市规划政策、以及气候条件等多重自然和社会经济因子综合作用的结果^[54]。通常,具有相同发展背景和发展阶段的区域,其 UGI 的时空格局变化表现出一定相似性,而同一时间的不同区域以及同一区域的不同时间阶段上,UGI 时空格局演变往往呈现出区域性和阶段性的特征^[45]。

本研究表明,总体来看,2000—2019 年辽宁中部城市群的 UGI 面积呈波动增长趋势,但其占城区比例不断下降且 UGI 景观趋于破碎化,表明该地区城市绿化网络建设滞后于城市化扩张速率,城市绿色空间增长与城市空间扩张并不同步,UGI 供需结构失衡状况加剧,城市环境保护让位于经济发展和城市空间扩张^[3, 12, 51]。这符合当前我国城市化发展及其内部空间格局演变的普遍性特征。在过去相当长一段时间,我国城市化进程总体上处于无序空间扩张且盲目追求速度的粗放型发展阶段,城市空间扩张往往以牺牲城市生态用地为代价^[1, 44]。此外,作为整体,辽宁中部城市群具有相似的自然环境、社会经济和人文历史背景,因此城市群 UGI 的时空演变规律具有一定程度的共性,但由于各城市处于不同发展阶段,经济发展模式和城市规划政策也存在差异,各城市的 UGI 时空格局演变也表现出各自的个性特征。

因此,各城市在城市 UGI 规划中,应充分考虑自身自然、社会经济等背景以及未来城市发展前景,制定符合当前城市发展阶段又具有前瞻性的城市规划政策;同时,各城市也可适当借鉴其他处于同等发展阶段或具有大体相似自然、社会经济背景的城市 UGI 规划经验,从而规避城市规划政策中的不合理性和不确定性^[45]。

3.3 基于水体指数和植被指数的 UGI 提取方法

植被指数和水体指数被广泛运用于城市绿地空间的时空格局演变研究之中。例如,李婷婷^[55]利用 Landsat 影像的 NDVI 和 MNDWI 提取了 2001—2016 年重庆市主城区绿色空间,并分析了其时空格局动态变化;Huang 等^[56]利用 Landsat 影像的 NDVI 数据分析了 1985—2015 年间北京市主城区植被增加和损失的空间分布特征。本文利用 GEE 平台构建了基于植被指数和水体指数的阈值分割解译方法,实现了对辽宁中部城市群近 20 年 UGI 的提取。精度验证结果表明该方法对 UGI 解译效果较好,可用于大区域尺度长时间序列的 UGI 时空格局演变分析。然而,该方法存在以下两个方面的不足。首先,有研究表明城市化背景下小斑块的 UGI 变化更为剧烈^[57],但本文使用的 Landsat 影像空间分辨率仅为 30 m,无法精确地识别城市内部小斑块的 UGI。其次,由于滑动平均法对影像噪声去除不完全,阈值分割产生的大量碎斑对局部区域的解译效果具有一定影响。因此,使用更高空间分辨率的遥感数据及更好的降噪技术来提高遥感影像质量,可进一步提升该方法对 UGI 的提取效果。

4 结论

基于 GEE 平台,本文首先提取了 2000—2019 年连续时间序列上辽宁中部城市群 UGI 及各城市边界,然后综合运用景观格局指数和 MSPA 方法分析了该时期辽宁中部城市群 UGI 时空格局演变规律。研究表明,2000—2019 年间,辽宁中部城市群 UGI 总面积呈波动上升趋势,但其占城市建成区比例在不断下降,城市绿地空间建设滞后于城市空间扩张。近 20 年间辽宁中部城市群 UGI 破碎化程度加剧,优势景观斑块的主导性减弱,景观形态趋于不规整和复杂化,且空间布局上更加分散,景观斑块之间的结合度变差。MSPA 分析进一步表明,快速城市化背景下,作为城市群重要生态源地的 UGI 核心区逐渐被蚕食,并转化为桥接区、分支和环岛区等其他类型的 UGI 景观或非 UGI 景观;同时,城市边缘区的 UGI 变化最为剧烈,且更易受到城市化扩张的影响。

本研究可为快速城市化区域 UGI 空间网络布局与优化和基于 UGI 的城市生态安全格局构建提供技术支撑和决策依据,对连续时间尺度上快速城市化区域 UGI 时空格局演变的研究也具有一定借鉴意义。但本文

还存在以下方面的不足:首先,Landsat 植被和水体指数阈值分割法的整体解译精度较好,但产生的大量碎斑影响了局部地区的分类效果,且无法有效识别规模较小(空间规模小于 30 m)的 UGI 景观;此外,本研究仅将绿地和水体作为 UGI 的主体进行识别,而没有对其进行进一步类型细分,无法更精确地识别 UGI 的具体类型并分析其景观格局和形态特征演变。因此,后续研究应从以上两个方面加以改进和补充。另外,如何在 MSPA 识别 UGI 景观类型的基础上进一步构建生态廊道和优化 UGI 网络,也值得后续研究进一步探究。

参考文献 (References):

- [1] Fu Y C, Li J F, Weng Q H, Zheng Q M, Li L, Dai S, Guo B Y. Characterizing the spatial pattern of annual urban growth by using time series Landsat imagery. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 274-284.
- [2] Li C L, Liu M, Hu Y M, Shi T, Qu X Q, Walter M T. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 301-311.
- [3] 颜文涛, 黄欣, 王云才. 绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展. *生态学报*, 2019, 39(4): 1165-1177.
- [4] 李春林, 刘森, 胡远满, 布仁仓, 孙凤云, 宫继萍, 陈探. 沈阳市降雨径流污染物排放特征. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1327-1336.
- [5] 吴义林, 赵明华, 刘森, 李春林, 胡远满, 睢晋玲, 孙凤云. 基于 SWMM 模型的沈阳典型小区非点源污染情景模拟. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 491-498.
- [6] 刘文平, 宇振荣. 北京海淀区绿色空间 PM_{2.5} 滞尘服务模拟. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2580-2586.
- [7] She Q N, Peng X, Xu Q, Long L B, Wei N, Liu M, Jia W X, Zhou T Y, Han J, Xiang W N. Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 297-306.
- [8] Bartesaghi-Koc C, Osmond P, Peters A. Spatio-temporal patterns in green infrastructure as driver of land surface temperature variability: the case of Sydney. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 83: 101903.
- [9] Imran H M, Kala J, Ng A W M, Muthukumaran S. Effectiveness of vegetated patches as Green Infrastructure in mitigating Urban Heat Island effects during a heatwave event in the city of Melbourne. *Weather and Climate Extremes*, 2019, 25: 100217.
- [10] Lemus-Canovas M, Martin-Vide J, Moreno-Garcia M C, Lopez-Bustins J A. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134307.
- [11] Yan J L, Zhou W Q, Zheng Z, Wang J, Tian Y Y. Characterizing variations of greenspace landscapes in relation to neighborhood characteristics in urban residential area of Beijing, China. *Landscape Ecology*, 2020, 35(1): 203-222.
- [12] Wang Y C, Shen J K, Xiang W N. Ecosystem service of green infrastructure for adaptation to urban growth: function and configuration. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2018, 4(5): 132-143.
- [13] Bartesaghi-Koc C, Osmond P, Peters A. Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 37: 154-167.
- [14] Chenoweth J, Anderson A R, Kumar P, Hunt W F, Chimbwanda S J, Moore T L C. The interrelationship of green infrastructure and natural capital. *Land Use Policy*, 2018, 75: 137-144.
- [15] 吴晓, 周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9211-9221.
- [16] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. *生态学报*, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [17] Ramyar R, Saeedi S, Bryant M, Davatgar A, Mortaz Hedjri G. Ecosystem services mapping for green infrastructure planning-the case of Tehran. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135466.
- [18] Zhang S N, Muñoz Ramírez F. Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: the case of Barcelona, Spain. *Cities*, 2019, 92: 59-70.
- [19] Maes J, Barbosa A, Baranzelli C, Zulian G, Batista E S F, Vandecasteele I, Hiederer R, Lique C, Paracchini M L, Mubareka S, Jacobs-Crisioni C, Castillo C P, Laval C. More green infrastructure is required to maintain ecosystem services under current trends in land-use change in Europe. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 517-534.
- [20] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3/4): 186-195.
- [21] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [22] du Toit M J, Cilliers S S, Dallimer M, Goddard M, Guenat S, Cornelius S F. Urban green infrastructure and ecosystem services in sub-Saharan Africa. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 249-261.
- [23] Meerow S, Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [24] 魏家星, 宋轶, 王云才, 象伟宁. 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建——以南京市浦口区为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1178-1188.
- [25] Wang K, Li Z Y, Zhang J J, Wu X, Jia M, Wu L. Built-up land expansion and its impacts on optimizing green infrastructure networks in a resource-dependent city. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102026.

- [26] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [27] Cai L Y, Zhuang M Z, Ren Y. A landscape scale study in Southeast China investigating the effects of varied green space types on atmospheric PM_{2.5} in mid-winter. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 49: 126607.
- [28] Chen M, Dai F, Yang B, Zhu S W. Effects of neighborhood green space on PM_{2.5} mitigation: evidence from five megacities in China. *Building and Environment*, 2019, 156: 33-45.
- [29] Chen W Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. *Cities*, 2015, 44: 112-120.
- [30] Pugh T A M, Mackenzie A R, Whyatt J D, Hewitt C N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14): 7692-7699.
- [31] 顾康康, 程帆, 杨倩倩. 基于 GISP 模型的城市绿色基础设施多功能性评估. 生态学报, 2018, 38(19): 7113-7119.
- [32] 张琳琳, 孔繁花, 尹海伟, 孙振如, 庄艳美, 居为民. 基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1591-1598.
- [33] 刘常富, 周彬, 何兴元, 陈玮. 沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2508-2516.
- [34] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [35] Vogt P, Ferrari J R, Lookingbill T R, Gardner R H, Riitters K H, Ostapowicz K. Mapping functional connectivity. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1): 64-71.
- [36] 黄河, 余坤勇, 高雅玲, 刘健. 基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建. 中国园林, 2019, 35(11): 70-75.
- [37] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 高云, 姚思瑶. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究. 生态学报, 2015, 35(2): 526-536.
- [38] 张梦嫚, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, 38(12): 4205-4213.
- [39] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [40] 刘淼, 胡远满, 孙风云, 李春林, 徐岩岩, 周媛. 土地利用模型 CLUE-S 在辽宁省中部城市群规划中的应用. 生态学杂志, 2012, 31(2): 413-420.
- [41] 郝凤明, 贺红土, 胡远满, 吴晓青, 常禹, 刘淼, 石铁矛, 王晋年. 辽宁中部城市群城市增长时空格局及其驱动力. 应用生态学报, 2010, 21(3): 707-713.
- [42] 宋超, 余琦殷, 邢韶华, 武占军, 李永霞, 任志和, 刘永胜. 近 30 年河北大海陀自然保护区山地草甸植被 (NDVI) 变化及其对气候的响应. 生态学报, 2018, 38(7): 2547-2556.
- [43] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [44] 李广东, 戚伟. 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响. 地理学报, 2019, 74(12): 2572-2591.
- [45] 陈康林, 龚建周, 刘彦随, 陈晓越. 近 35a 来广州城市绿色空间及破碎化时空分异. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1100-1113.
- [46] Mcgarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1995.
- [47] Li C L, Liu M, Hu Y M, Zhou R, Wu W, Huang N. Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood management. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124420.
- [48] Huang C H, Yang J, Lu H, Huang H B, Yu L. Green spaces as an indicator of urban health: evaluating its changes in 28 mega-cities. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1266.
- [49] van den Berg A E, Maas J, Verheij R A, Groenewegen P P. Green space as a buffer between stressful life events and health. *Social Science & Medicine*, 2010, 70(8): 1203-1210.
- [50] Yang M, Dijst M, Faber J, Helbich M. Using structural equation modeling to examine pathways between perceived residential green space and mental health among internal migrants in China. *Environmental Research*, 2020, 183: 109121.
- [51] 许晶, 陈宏伟, 刘娜, 齐淑艳, 洪娇娇, 袁昊. 沈阳市 2004—2014 年城市绿地生态系统变化及生态服务价值差异. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2018, 30(6): 458-464.
- [52] 李春林, 刘淼, 胡远满, 徐岩岩, 孙风云. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析. 生态学报, 2014, 34(3): 727-737.
- [53] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力. 生态学报, 2015, 35(13): 4357-4366.
- [54] Wu Z, Chen R S, Meadows M E, Sengupta D, Xu D. Changing urban green spaces in Shanghai: trends, drivers and policy implications. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104080.
- [55] 李婷婷. 城市绿色空间时空演变及其对生态环境效应的关联性研究——以重庆主城区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [56] Huang H B, Chen Y L, Clinton N, Wang J, Wang X Y, Liu C X, Gong P, Yang J, Bai Y Q, Zheng Y M, Zhu Z L. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 166-176.
- [57] Wang J, Zhou W Q, Qian Y G, Li W F, Han L J. Quantifying and characterizing the dynamics of urban greenspace at the patch level: a new approach using object-based image analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 94-108.