#### DOI: 10.5846/stxb201306101563

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. Cao Y K, Fu M C, Xie M M, Gao Y, Yao S Y.Landscape connectivity dynamics of urban green landscape based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and linear spectral mixture model (LSMM) in Shenzhen. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2):526-536.

# 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究

曹翊坤1,2,付梅臣2,谢苗苗2,\*,高 云2,姚思瑶2

1 北京市海淀区房屋管理局,北京 100193

2 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院,北京 100083

摘要:基于线性光谱混合模型(LSMM, Linear Spectral Mixture Model),引入形态学空间格局分析(MSPA, Morphological Spatial Pattern Analysis)进行城市地域绿色景观连通性评价。根据城市绿色景观特点和 MSPA 方法中的 7 种连通性类型的涵义,定义 了城市绿色景观连通性功能类型。以深圳市 1986 年、1995 年、2000 年、2005 年及 2010 年五期 Landsat TM 影像为数据源,应用 线性光谱混合模型提取植被覆盖率,得到深圳市植被覆盖图。在此基础上,提取出高、全植被覆盖作为目标像元进行 MSPA 处理,分析植被覆盖状况与绿色景观功能类型的时序总体特征及空间梯度动态。结果表明:深圳市绿色景观破碎程度较高,表现 为对结构连通性贡献最小的斑块类型总数最大。城市内部东西部连通性呈现出不同变化的趋势;右侧外圈层的大鹏半岛结构 连通性最佳;在同一城市化发展梯度上,东部的样带连通性水平比西部要好。在城市化过程中,深圳市高、全覆被植被像元连通 性大小受以下因素的影响:城市化程度,地形因素及区域定位。在同一城市化程度上,地形因素对景观连通性的影响较大。从 整体的时间变化和空间梯度动态分析可知,在快速城市化过程中植被覆盖率和连通性功能均下降,而到稳定城市化阶段植被覆 盖率和连通性均得到改善。研究表明线性光谱混合模型与形态学空间格局分析相结合可以较好的表征城市绿色景观连通性类 型时空分布特征,进而明晰城市化过程与区域内绿色景观数量及连通性动态变化关系。

# Landscape connectivity dynamics of urban green landscape based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and linear spectral mixture model (LSMM) in Shenzhen

CAO Yikun<sup>1,2</sup>, FU Meichen<sup>2</sup>, XIE Miaomiao<sup>2,\*</sup>, GAO Yun<sup>2</sup>, YAO Siyao<sup>2</sup> 1 Haidian District Housing Authority of Beijing, Beijing 100193, China

2 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Urban area is the main environment where human are living. The stability of internal ecosystem of a city is highly relevant with its sustainable development. Besides, the connectivity of urban green landscapes is a symbol of the integrity and stability of regional ecological functions. Urbanization has brought a dramatic transformation to urban landscape connectivity. The research on the dynamic changes of landscape connectivity is not only significant to the stability of an urban ecosystem, but also provides a basis for regional biodiversity conservation, urban planning, and land use planning and management. However, current connectivity indicators have obvious limitations, for example, indices over different landscape patterns may show familiar values; graph theory requires a human interpretation because of redundancy data, and research on large-scale landscape may cause data extinction during processing. In this paper, Linear Spectral Mixture Model (LSMM) was integrated into Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) to evaluate the spatial and temporal dynamics

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2014-07-03

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41101175);国家自然科学面上基金(41171440)资助

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xmiaomiao@gmail.com

of green landscape connectivity in Shenzhen. According to the urban landscape characteristics and MSPA theory, 7 types of connectivity were defined for urban green landscapes, and then the change features among different urbanization gradients were analyzed. We defined urbanization gradients as three different circle layers based on urbanization density, with a decrease of dense values from the first circle to the third. The main steps followed: 1) LSMM was applied to extract the vegetation coverage information from multi-temporal Landsat TM images. On that, the high and full covered vegetation pixels were defined as the foreground pixels (green landscape) in MSPA approach. 2) 7 types of connectivity were utilized to reveal the temporal and spatial variations of green landscapes in the process of urbanization. The results demonstrated that: 1) over 27% of green landscapes in Shenzhen did not contribute to connectivity during 24a. 2) The transition matrix of connectivity-pattern categories from 1986 to 2010 indicated that the connectivity areas were sharply fluctuated during 24a, and the majority of classes changed into non-green landscapes. Except for the core category, the areas of other connectivity categories showed an upward trend. The connectivity of internal urban landscapes showed different trends between eastern part and western part, and, the Dapeng Peninsula in the third circle showed the best connectivity among the whole city. The peak interval of connected categories showed that the eastern part of Shenzhen had more connectivity providers than the western part. 3) The overall connectivity of Shenzhen's green landscapes followed a change of "decrease-increase" in sequence. Comparing with Shenzhen's urbanization process, it is proved that the quantity and connectivity of green landscapes were affected by the following factors: urbanization level, topographic factor and regional policy. Additionally, it is found that the topographic factor had the greatest influence within the same urbanization level. The results from temporal variations and spatial gradients demonstrated that both vegetation coverage and connectivity showed a downward trend in rapid urbanization process, while the two have been improved in steady urbanization stage. The experimental results prove that the jointly analytical framework is efficiently applied to reveal the spatial and temporal dynamics of connectivity characteristics for urban green landscapes during the process of urbanization. Furthermore it enables us to know the relationship between urbanization and urban green landscape connectivity. This research can be applied in practice and provide benefits for monitoring urban green landscapes.

Key Words: urban green landscape; landscape connectivity; morphological spatial pattern analysis; Shenzhen

城市是人类居住的主要区域<sup>[1]</sup>,城市绿色景观包含城市绿地及耕地、园地、林地或其他农用地<sup>[2]</sup>,是城市 生态系统服务的重要提供者之一,具有缓解城市热岛效应<sup>[3]</sup>、固碳释氧<sup>[4]</sup>、减少城市大气污染<sup>[5]</sup>、保护城市生 物多样性<sup>[6]</sup>等功能。城市化过程造成绿色景观数量和格局发生剧烈变化,破碎程度加剧。在高度破碎化的 景观中,连通性有利于维持种群个体在残留生境扩散,缓解片段化种群的局域灭绝风险,是区域土地可持续利 用和生物保护领域的主要指标<sup>[7]</sup>,是人类强烈干扰区域中的物种丰富度<sup>[8]</sup>和迁徙过程<sup>[9]</sup>的物质基础。因此 绿色景观连通性影响着城市生态系统发挥作用,是评价城市生态平衡和环境改善的重要依据。

目前连通性研究多通过景观格局指数<sup>[10-11]</sup>和模型<sup>[12]</sup>进行识别分析。其中格局指数应用最为广泛,但也 具有明显的局限性<sup>[11-15]</sup>:例如景观水平上的指数只能提供单一数值,缺少空间分布信息;由于指数高度概括, 不同连通性格局的景观可能在指数上表现出相似数值;其生态学意义较为局限,例如表征斑块形状特征的周 长-面积比指数,仅能识别出连接廊道的格局特性。近些年国内外研究者提出了图论法<sup>[16]</sup>及模型与指标耦 合<sup>[17-18]</sup>度量景观连通特征。前者可较好的识别景观中关键节点和多种连接,但需结合其他方法识别廊道<sup>[19]</sup>, 且结果数据冗余,需进一步的修正<sup>[20]</sup>。后者能综合考虑景观结构和功能变化的影响因素,弥补单一方法或指 数的缺陷<sup>[21]</sup>。但上述方法都是基于斑块的评价,在大尺度景观的研究中的应用易湮灭小型斑块,造成结果精 确度欠佳<sup>[22]</sup>。

区别于传统的景观连通性评价以斑块为中心的方式,基于形态学的格局分析方法(MSPA)方法<sup>[23-24]</sup>从像 元的层面上提取出具有景观连通性意义区域(如:节点和廊道),从空间形态上说明其连通性功能,体现其在 物质信息能量流的作用,突出连接和生态踏脚石等景观要素,不仅能量化结构连通性也可量化功能连通性<sup>[25]</sup>。其应用发展从"边缘类别制图<sup>[26]</sup>"、"内部生境渗透度<sup>[27]</sup>"到卷积算法在森林景观连通性的实证研究<sup>[28-30]</sup>,均获得预期的效果。对美国 Delmarva 半岛森林<sup>[31]</sup>和斯洛伐克北部森林区<sup>[32]</sup>的研究表明 MSPA 各类型很好的反映了各生境斑块的连通性功能,且能同时识别多种具有连通性意义的空间类型而不受研究区尺度过大的影响。在对美国绿色基础设施规划与评价研究中满足了跨州际及时间动态管理的需求<sup>[25]</sup>。

目前应用 MSPA 方法评价森林景观连通性多使用中分辨率影像或者地类作为数据来源。城市地表覆被 较森林景观更为复杂,除了林地、耕地等地类,还包括内部的绿色空间<sup>[33]</sup>,利用遥感影像进行地类解译往往由 于大量混合像元的存在,影响绿色景观的提取效果。线性光谱混合模型(LSMM, Linear Spectral Mixture Model)则以其简单、高效、物理意义明确等优点,有效解决了混合像元问题<sup>[34]</sup>,并且植被覆盖率可作为城市绿 色景观覆盖质量的表征。本文探讨结合 LSMM 与 MSPA 方法,以快速城市化地区深圳市为例,进行城市绿色 景观的提取与连通性功能类型划分,量化评价绿色景观连通性格局在 1986 年至 2010 年间城市化过程中的时 空动态,探讨城市化过程中绿色景观连通性的时空演化一般特征和驱动因素。

#### 1 研究区与数据来源

# 1.1 研究区概况

深圳地处广东省中南部沿海,陆地范围为 E 113°46′—114°37′,N 22°27′—22°52′;全市总面积 1952.84 km<sup>2</sup>。地貌类型多样,以丘陵、阶地和平原为主;结构上呈阶梯状分布。地势东南高,西北低;地面坡度较缓和。气候属南亚热带海洋性季风气候,年平均温度 22.4 ℃,年降水量 1948 mm。主要植被类型包括亚热带常绿季雨林、山地常绿阔叶林、亚热带常绿针叶林、红树林、竹林、亚热带常绿灌丛、草丛等近自然植被和人工林及农业植被等人工植被。在快速的城市化过程中,原生植被多被破坏,现存植被多为次生林、人工林和经济作物<sup>[35]</sup>。

# 1.2 数据源及预处理

本研究数据源包括深圳市 2010 年、2005 年、2000 年、1995 年和 1986 年 5 个时期的 Landsat TM 卫星遥感 影像,轨道号均为 121/44 和 122/44,均选择秋冬季节无云、成相质量好的影像。数据预处理包括辐射校正、 几何校正与裁剪等,采用的软件为 ArcGIS9.3、Envi4.3。

# 2 城市绿色景观连通性功能类型提取

#### 2.1 植被信息提取

VIS 模型(Vegetation-Impervious-Soil)<sup>[36]</sup>提出对基于光谱分析定量提取城市景观组分具有重要的意义,其中线性光谱分离技术(LSMM)由于能够形成高质量的组分图、较低的误差、易于处理等<sup>[37]</sup>成为应用最为广泛、成熟的模型,适合于本研究。处理过程包括 MNF(Minimum Noise Fraction)变换、PPI(Pixel Purity Index)处理、终端单元的收集、线性光谱分离、结果的检验与校正等<sup>[38-39]</sup>。根据深圳市地物特征,选取高反照、低反照、植被与土壤四个端元<sup>[35,40]</sup>。采用光谱分离均方差与样区检验两种方法对分离的结果进行精度检验,图像平均误差 0.0055,均方差大于 0.1 的像元数量 2 个,在可接受范围之内<sup>[35]</sup>。并选用 GOOGLE EARTH 上的高分辨率影像进行分层与随机抽样的方式进行精度检验,选取 100 个 300 m×300 m 样区配准至 TM 数据,目视解译得到单一的植被覆盖分布,与线性光谱分离的图像进行比对,得出植被覆盖度均方差误差为 0.089,精度较高能够满足研究要求。最终得到深圳市 5 期植被覆盖率分布图(图 1)。

MSPA 方法在城市绿地景观环境应用的关键是二值栅格图中目标像元与背景像元的区分。在随机图上, 形态空间格局等级的多样性依赖于表现出来的目标像元数量<sup>[41]</sup>。根据渗透理论<sup>[42]</sup>和文献中对高覆盖度植 被的界定<sup>[43]</sup>,本研究中定义植被覆盖率达到 60%的像元作为的目标像元,即绿色像元,在二值图中赋值为 1, 其余为背景像元,赋值为 0,既可通过 MSPA 评价整体连通性又可通过植被覆盖度阈值保证像元内部的连



2期



图 1 深圳市 1986—2010 年植被覆盖率分布图 Fig.1 Vegetation fraction of Shenzhen from 1986 to 2010

# 2.2 连通性功能类型

MSPA 识别目标像元集与结构要素之间的空间拓扑关系,将目标像元集分为核心、斑块、孔隙、边缘、桥接、环道和支线 7 种类型<sup>[44]</sup>。结合城市绿色像元的分布和形态聚集特征,表现出不同于森林景观的内涵,其定义、特征和表象如下表所示(表 1)。

Table 1 The definition, characteristics and appearance of morphological spatial pattern analysis (MSPA) classes in urban area							
形态学格局分析类型 Morphological spatial pattern analysis (MSPA) classes	定义 Definition	特征及表象 Characteristics and appearance					
核心类 Core	指大量绿色像元的聚集,且与边界有一定 距离 <sup>[44]</sup>	通常为大型公园,城市周边森林保护区(森林公园),风景 名胜区等;是高覆盖植被的聚集中心,显示出对于城市生 物物种来说具有潜在的、适宜的、完整的生境					
斑块类 Islet	指不相连且聚集数量少而不能作为核心类的绿色像元集合 <sup>[44]</sup>	单独的景观碎块,内部有机质与外界的有机质交换流动的 可能性较小。多出现在城市中的附属绿地如居住区绿地、 街心公园、道路广场等,本身具有较高的植被覆盖,但不与 其他植被斑块相连					
孔隙类 Perforation	指核心类和非绿地斑块之间的过渡区域,即 绿色空间内部边缘地带 <sup>[44]</sup>	是阻碍核心类中物种运动的外围边线 <sup>[25]</sup> 。受到人类活动 或者自然条件的影响表现出植被退化的核心类边缘地带					
边缘类 Edge	指核心类和主要非绿地区域之间的交接 区域 <sup>[44]</sup>	多指公园、风景名胜区外围的林带,具有较好的植被覆盖特征,与建成区域相连,往往具有能量和物质交换丰富的特征					
桥接类 Bridge	指连接至少两个不同核心类的非核心绿色 像元集,并表现出狭长的廊道特征 <sup>[44]</sup>	覆盖状况良好的带状绿地,如大型绿化带等,其数量的多 少表示了各个核心类区域之间的连通程度,是能量交换和 物质流动的迁移通道					
环道类 Loop	指连接一处核心类的狭长绿色像元集合,同 样也具有廊道的特征 <sup>[44]</sup>	核心类内部相连的捷径,其数量影响到核心类内部之间的 聚集程度					
支线类 Branch	指非核心类区域且只有一端与边缘类、桥接 类、环道类或孔隙类相连的绿色像元 集合 <sup>[44]</sup>	代表着能够与核心类建立联系的绿色像元。说明绿色空间内部的能量交换和物质流动的最大范围,支线类与非绿地区域内部的物质和能量交换较多					

表1 城市地域中 MSPA 类型定义及特征

2.3 MSPA 方法参数确定

在运算过程中需定义4种关键参数<sup>[45]</sup>。

(1) 像元大小

同指栅格图的空间分辨率。据研究,城市绿地斑块面积达到 1 hm<sup>2</sup>以上时,才能缓解城市热环境聚集效 应<sup>[46]</sup>,因此将筛选出来的绿色像元进行合并。通过对 90 m×90 m 和 100 m×100 m 重采样结果对比,前者误差 小于 0.02%,可忽略不计,因此采用 90 m 为本研究像元边长。

(2)尺寸参数

是基于目标景观范围的定义,与研究尺度相关。由于地图的范围,空间和制图比例尺等参数与本文目的 无关,因此不讨论这些因素<sup>[45]</sup>。尺寸参数是腐蚀或者膨胀等算子运算的宽度;其与边缘类和孔隙类的宽度, 核心类面积的最小值以及斑块面积的最大值相关<sup>[41]</sup>。

(3)结构要素

结构要素是指对目标景观类型图进行处理的单位。通过结构要素对栅格像元进行一系列逻辑运算(如: 对栅格像元取并集、交集、补集等)来达到分析景观格局的目的。分为8邻域和4邻域<sup>[42]</sup>。考虑到避免格网 连接悖论<sup>[45]</sup>以及城市景观的复杂多样性,将绿色像元区(前景区)设置为8邻算法,非绿色像元区(背景区) 设置4邻算法。

(4)边缘宽度参数

由尺寸参数 S 和像元大小 P 决定<sup>[32]</sup>。本研究中没有设定目标物种,默认一个像元的边长作为边缘宽度参数。 2.4 连通性功能类型时空动态分析

经过 MSPA 分析得到各时点深圳市绿色景观连通性功能类型格局(图 2)。



图 2 1986—2010 年深圳市绿色景观连通性功能类型分布图 Fig.2 Classification maps of connectivity pattern of green landscape of Shenzhen from 1986 to 2010

为凸显城市内部的差异性,研究城市化过程在空间梯度上对绿色景观连通性的影响而采用典型样带分析。参考前人研究成果<sup>[46-48]</sup>,选用 3 km 间隔的"S"型格网由西向东穿越各个城市发展圈层并编号(图 3)。 并将样带格网分为第 1 圈层(43—57)、第 2 圈层(26—42,58—67);考虑到第 3 圈层内部也有分化,将 12— 25,68—80 划为第 3 圈层;1—11,81—91 为外圈层。

# 3 深圳市绿色景观连通性功能类型时空动态分析

- 3.1 绿色景观连通性功能类型结构变化分析
- 3.1.1 绿色景观连通性功能类型时序总体变化特征

在研究期内,深圳市的绿色景观连通性功能类型的总量和各类型的分量都发生了较大的变化(表2)。体

35 卷



现为如下几个特点:

(1)研究期内对连通性贡献最低的斑块类总数最大,其次为桥接类,孔隙类最少;而核心类面积波动幅度最大。

(2)除斑块类外其他 6 种连通性功能类型面积呈现先减后增的趋势,均在 2000 年处于峰谷位置;其中核 心类减少了 86.34%,减幅最大;2000 年之后,各类型面积显著增加,核心类增长幅度最大,达到 286%,其他类 型面积增幅超过 135.18%。斑块类在此期间先减少后增长再减少,在 1986—1995 年间减少的比例最低为 34.24%,2000 年到 2005 年间,斑块类略有增长。2005—2010 年间,各类型面积变化趋势分异增大,增幅最大 达到 119.35%(核心类),其次是边缘类为 79.92%,而斑块类相对上一期减少了 6.29%。

Table 2 Area of each MSPA classes in Shenzhen from 1986 to 2010							
类型 Classes	1986年	1995 年	2000 年	2005 年	2010年		
支线 Branch	4652.64	2134.35	1418.31	3335.58	4382.91		
边缘 Edge	4850.28	1222.29	1009.26	2533.68	4558.68		
孔隙 Perforation	83.43	14.58	11.34	38.88	59.94		
斑块 Islet	10360.71	6813.72	7106.13	8882.46	8323.56		
核心 Core	5871.69	801.9	630.99	2435.67	5342.76		
桥接 Bridge	6478.38	2203.2	1556.82	4082.4	6445.98		
环道 Loop	1439.37	591.3	466.56	1061.1	1555.2		

表 2 1986—2010 年各类绿色景观连通性功能类型面积变化/hm<sup>2</sup>

# 3.1.2 城市绿色景观连通性功能类型时序转移矩阵

1986 年至 2010 年的连通性功能类型转移矩阵说明其内部空间变化特征<sup>[49]</sup>。到研究期末,除孔隙外各类型转为非绿色像元区域比例均为最大值(表 3)。类型内部转换中,多向连通性高的类型转换,说明保留下来的绿色景观连通性在改善。如:2.97%的斑块转为支线类,12.78%的支线类和 11.04%的环道类转成了桥接类;桥接,孔隙和边缘类转换为核心类的较多,分别为 13.33%、50.49%和 19.33%。而核心类中有 17.67%转化成为边缘,显示出期间有部分核心景观萎缩。

	• • •							
Table 3 Transition matrix of MSPA classes and background changes from 1986 to 2010 in Shenzhen								
			绮	色景观连通	性类型转移比	例/%		
1986—2010		The transformation proportion among MSPA classes and background						
	非绿色像元	斑块	支线	环道	桥接	孔隙	边缘	核心
	Background	Islet	Branch	Loop	Bridge	Perforation	Edge	Core
非绿色像元 Background	91.59	3.81	1.36	0.38	1.48	0.01	0.87	0.51
斑块 Islet	80.61	12.07	2.97	0.90	1.82	0.00	1.12	0.52
支线 Branch	54.36	7.16	12.05	2.61	12.78	0.00	6.30	4.74
环道 Loop	44.17	8.45	10.08	6.99	11.04	0.00	9.75	9.52
桥接 Bridge	39.56	3.64	8.77	3.04	21.13	0.26	10.27	13.33
孔隙 Perforation	18.45	0.00	0.00	8.74	3.88	3.88	14.56	50.49

4.06

3.88

16.08

16.22

0.13

0.28

18.16

17.67

表 3 1986—2010 年深圳市域绿色景观连通性功能类型变化率
-----------------------------------

3.2 城市绿色景观连通性功能类型空间梯度分异特征

32.00

18.18

3.01

1.01

2010 年深圳市绿色景观连通性类型像元数量沿样带编号方向呈现不同的趋势(图4)。随着样带推进, 核心、边缘、桥接和支线类趋势较为一致;而环道类的趋势显示出一种"N"型的趋势。斑块除在右侧外圈层降 幅明显外,数量始终维持在较高的水平上。各圈层连通性功能类型的平均数量分异代表了不同城市化发展空 间梯度上连通性变化规律(表4)。由于孔隙类在采样中数量少,因此在以下分析中不考虑孔隙的变化。

7.23

4.18

表 4 深圳市各圈层空间梯度样带各格网 MSPA 类型平均数量(2010 年)

Table 4 The average counts of MSPA classes for each grid of spatial gradients in each circle in Shenzhen(2010)

图巨(	类型数量 Classes/个						
Circle Number (Transects Number)	斑块	支线	环道	桥接	边缘	核心	
· · · ·	Islet	Branch	Loop	Bridge	Edge	Core	
外圈层(1—11) Outside Circle(1—11)	33.63	3.90	4.47	0.00	0.00	0.00	
第3圈层(12-25) Third Circle(12-25)	27.57	5.36	2.21	5.36	1.43	0.36	
第2圈层(26—42) Second Circle(26—42)	39.65	13.59	1.76	12.35	2.41	0.82	
第1圈层(43—57) First Circle(43—57)	56.67	21.80	7.67	18.80	12.73	6.93	
第2圈层(58—67) Second Circle(58—67)	49.20	53.40	10.70	88.80	50.00	37.00	
第3圈层(68—80) Third Circle(68—80)	73.00	20.77	4.00	29.62	13.38	12.54	
外圈层(81—91) Outside Circle(1—11)	27.00	76.64	31.00	111.73	90.00	106.27	

(1)外圈层的 81—91 号样带景观连通性最佳,表现在核心、边缘及桥接这 3 类具有重要连通功能意义的 类别出现最大值(分别为 337、133、286)且平均值最大。而同外圈层的 1—11 号样带中以斑块类型为主,前三 类数值为 0。

(2)城市内部3个圈层东西样带相比,东部样带表现出连通性优势;且除斑块以外的6种类型均在东部的2圈层达到最大值。西部样带在从第3到第1圈层的位移中,各连通功能类型变化趋势为单调递增;东部 样带则表现出先增后减的趋势,各类型高值区出现在第2圈层。

(3)各圈层类型总数代表了绿色像元的数量。1—11号样带中绿色像元数比 12—25 号少,且具有连通性 意义类型数量为 0。说明在快速城市化地区的植被覆盖率和连通性功能均处于弱势。

(4)样带 43—57 比 68—80 号绿色像元少,对比各类型平均值,核心区差值(5.61)比边缘区(0.65)大,说 明第 1 圈层内部核心区虽数量少,但形状较第 3 圈层更不规则,且支线和环道的数量比 68—90 号样带多,说 明该区域内的核心类聚集程度及绿色像元能量交换和物质交换范围较第 3 圈层更优。同时,43—57 样区斑 块平均值比例比 68—80 号样带小。

整体上,外圈层81—91号样带连通性功能最好;在城市内部,连通性功能大小在西部样带呈现出第1圈

边缘 Edge

核心 Core

19.33

38.59





层>第2圈层>第3圈层的趋势,而东部样带则是第2圈层>第1圈层>第3圈层;在同一城市化发展梯度上, 东部的样带结构连通性水平比西部要好。

## 4 讨论

#### 4.1 深圳市绿色景观连通性动态特征及原因分析

1986 到 2010 年间,深圳城市发展经历了"快速扩张、提高整合、科学转型"3 个阶段<sup>[48,50]</sup>,本次研究表明, 期内深圳市绿色景观及其连通性随着城市化进程而变化,呈现出先减小后增加的趋势。研究期内,深圳市绿 色景观对结构连通性贡献最小的斑块类型总数最大,呈现出破碎程度较高的状态。转移矩阵表明,深圳市绿 色景观处于剧烈波动中,一是大量初期绿色像元到期末转为非绿色像元,说明城市化过程中去植被化或是植 被覆盖率降低。二是绿色景观连通性类型内部转化以向连通性意义高的类型转化为主。

在时序分析的基础上,本文从空间梯度上对连通性功能类型变化趋势进行了研究,以细化城市发展阶段 对绿色景观连通性影响。在外圈层,1—11号样区对应宝安区公明中部及松岗北部,81—91号样区对应大鹏 半岛,均为城市发展相对滞后区域<sup>[48,51]</sup>,区域间连通性功能类型的数量差异与地形及政策相关。宝安区远离 市中心且地势平坦,支柱产业为工业,建设用地规模长期保持扩张趋势。大鹏半岛地形以山地为主,是深圳市 生态环境重点保护区,政策的倾斜和城市发展限制<sup>[52]</sup>使得该区域内表现出优质的生态环境。第三圈层内东 部(龙岗区龙岗街道)较西部(宝安区松岗街道)以斑块为主的各类型数量都要多,说明受地形的庇护,东部植 被覆盖程度比西部好,但该圈层景观连通性功能主要受城市化程度的影响。 在第2圈层,东西样区的连通性功能类型数量存在较大差异。西部的龙岗、观澜及松岗,地势平坦,在前 期城市化过程中建设用地规模大幅提高<sup>[48]</sup>;而东部样区穿过梧桐山脉,地势相对较高,地形狭小<sup>[53]</sup>,加之梧 桐山是深圳唯一的省级风景名胜保护区,连通性处于较高水平。

第1圈层穿过南山、福田及罗湖区,是深圳的城市中心,也是深圳市城市化进程的最高阶段。其连通性功 能比西部第2圈层优,但不如东部第2圈层是因为东部样区位于盐田区,其区域功能为港口及旅游区,具有成 片的山体限制了建设活动在空间上的扩张,显示出景观较为聚集。

综上所述,城市化发展阶段、区域政策定位及地形因素是影响深圳城市连通性功能类型数量的主要因素, 且地形因素影响显著地区连通性。从不同城市化阶段的空间梯度分析可知,在快速城市化地区植被覆盖率和 连通性功能均处于弱势,而城市化达到一定程度后(第2圈层)地形因素超过了城市化进程对植被覆盖和连 通性的影响力,到高度城市化地区(第1圈层),随着城市对绿色景观的保育与恢复,连通性得到提升。

### 4.2 MSPA 方法应用

对比前人研究<sup>[46,54]</sup>的结论,印证了 MSPA 方法的实用性,且使用简便,参数定义明确,能够从空间聚集形态上直观的辨出具有连通性意义的目标像元集,能够明晰城市化过程中绿地景观连通性的时空特征和动态变化,其研究结论对于城市景观规划、环境建设、生物多样性保护和生态网络规划具有一定的参考价值。

采用整体连通性(IIC)和可能连通性(PC)对深圳市生态用地连通性的研究<sup>[55]</sup>得出了与本文时态趋势相反的结论,原因一是其采用的基础数据为地类数据,本文采用的全高覆被像元,不仅仅体现覆盖类型也体现出覆盖程度,从侧面也表明深圳市生态用地虽数量减少,但覆盖率有提高;二是 IIC 和 PC 的大小受研究尺度的影响,侧重于市域尺度的整体连通性,而 MSPA 方法侧重于各种不同连通性类型的空间分布。本研究表明核心景观多出现在龙岗、盐田和罗湖区,其他研究也表明该区域为深圳市生态安全格局中的"源地"的主要分布地<sup>[56]</sup>,说明 MSPA 方法的实用性。目前深圳已起草《深圳经济特区园林绿化条例(修订草案稿)》推进立体绿化在城市的推广,在增加地区实证验证的基础上,该方法能够为立体绿化布局提供参考,保护和改善连接和踏脚石等具有重要连接意义的区域,为生态城市规划提供基础信息。

相对景观格局指数方法<sup>[57]</sup>,MSPA方法简单,不需考虑指数之间的相关性。但像元(P)和边缘宽度参数(S)的大小对连通性类型格局具有显著影响,需根据研究区特点或者物种习性加以说明。结构连通性中,P的增大使得目标区信息的减少,且分析结果中核心景观显著减少。而相对S的增加,P的变化对核心景观和边缘类型的变化影响相对较小<sup>[45]</sup>。但不论S如何变化,给定P的情况下,结果始终保持精确<sup>[45]</sup>。对于具体的物种,其功能连通性研究的关键就在于S的确定<sup>[44]</sup>。本文通过先验研究确定像元大小与边缘宽度,在后续研究中,可进行多尺度对比研究,并结合不受景观类型和尺度限制的图论法等研究方法,深入了解景观连通性的尺度效应。连通性格局对城市生态系统功能及服务价值均有影响,将本文研究成果与生态环境效应结合起来必将深化城市环境下景观生态学格局-过程的理论与实证。基于LSMM与MSPA的绿色景观连通性分析方法注重亚像元连通性与整体连通性的结合,但并未关注具体地类,对城市内部的核心景观在生态安全格局中的重要程度仍需借助其他方法体现。

#### 5 结论

本文根据 LSMM 方法提取深圳市高、全覆盖的绿地像元作为城市绿色景观,结合形态学空间格局分析方法(MSPA),划分出 7 种在城市生态环境下具有不同连通性功能的绿色景观类型,通过分析其时序总体特征 及空间梯度动态过程判定,揭示出城市化过程中城市绿色景观连通性变化特征和影响因子。结果显示,总体 上具有连通性意义的绿色像元数量在时间轴上呈现出先减少后增大的变化趋势;空间上绿色景观连通性的高 低受到城市化程度、地形因素以及区域定位影响;在同一城市化程度上,地形因素对景观连通性的影响较大。 从整体的时间变化和不同城市化阶段的空间梯度分析可知,在快速城市化过程中植被覆盖率和连通性功能均 下降,到稳定城市化阶段,城市对绿色景观的保育与恢复使得连通性得到提升。研究加深了复杂城市景观中,

### 城市绿色景观连通性时空动态特征与影响因素的理解。

#### 参考文献(References):

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects, the 2011 Revision. [2013-06-08]. http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm.
- [2] 张小飞,李正国,王如松,王仰麟,李锋,熊侠仙.基于功能网络评价的城市生态安全格局研究——以常州市为例.北京大学学报:自然 科学版 网络版(预印本), 2009, (1): 54-62.
- [3] 陈辉,古琳,黎燕琼,慕长龙.成都市城市森林格局与热岛效应的关系.生态学报,2009,29(9):4865-4874.
- [4] 陈莉,李佩武,李贵才,苏笛,袁雪竹.应用 CITYGREEN 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益. 生态学报, 2009, 29(1): 272-282.
- [5] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 王惟, 刘常富. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1465-1470.
- [6] Imai H, Nakashizuka T. Environmental factors affecting the composition and diversity of avian community in mid-to-late breeding season in urban parks and green spaces. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(3): 183-194.
- [7] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. 生态学报, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [8] Alexis A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. Urban Forestry and Urban Greening, 2006, 5(4): 195-201.
- [9] Vergnes A, Viol I L, Clergeau P. Green corridors in urban landscapes affect the arthropod communities of domestic gardens. Biological Conservation, 2012, 145(1): 171-178.
- [10] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C. Ene. E. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical. [2013-06-08]. http://www. umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- [11] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the priorization of habitat patches and corridors for conservation. Landscape Ecology, 2006, 21(7): 959-967.
- [12] 岳天祥, 叶庆华. 景观连通性模型及其应用. 地理学报, 2002, 57(1): 67-75.
- [13] Magle S B, Theobald D M, Crooks K R. A comparison of metrics predicting landscape connectivity for a highly interactive species along an urban gradient in Colorado, USA. Landscape Ecology, 2009, 24(2): 267-280.
- [14] Zipperer W C, Foresman T W, Walker S P, Daniel C T. Ecological consequences of fragmentation and deforestation in an urban landscape: a case study. Urban Ecosystems, 2012, 15(3): 533-544.
- [15] Minor E S, Urban D L. A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. Conservation Biology, 2008, 22 (2): 297-307.
- [16] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. Ecology, 2001, 82(5): 1205-1218.
- [17] 富伟,刘世梁,崔保山,张兆苓.景观生态学中生态连接度研究进展.生态学报,2009,29(11):6174-6182.
- [18] 吴昌广,周志翔,王鹏程,肖文发,滕明君.景观连接度的概念、度量及其应用.生态学报,2010,30(7):1903-1910.
- [19] 蔡青,曾光明,石林,梁婕,黄璐,韦安磊.基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别.地理研究,2012,31(8):1523-1534.
- [20] 韩凌云,徐振,阮宏华,瞿晓怡,陈桂娟,冯育青,金裕华.基于景观图论和生物能学的景观演变分析方法.生态学杂志,2012,31(6): 1597-1604.
- [21] Lookingbill T R, Elmore A J, Engelhardt K A M, Churchill J B, Gates J E, Johnson J B. Influence of wetland networks on bat activity in mixeduse landscapes. Biological Conservation, 2010, 143(4): 974-983.
- [22] 孙小芳, 卢健, 孙依斌. 基于分割的多尺度城市绿地景观. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1660-1664.
- [23] Vogt P, Ritters K H, Estreguil C, Kozak J, Wade T G, Wickham J D. Mapping spatial patterns with morphological image processing. Landscape Ecology, 2007, 22(2): 171-177.
- [24] Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. Berlin: Springer-Verilog, 2003.
- [25] 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.
- [26] Metzger J P, Muller E. Characterizing the complexity of landscape boundaries by remote sensing. Landscape Ecology, 1996, 11(2): 65-77.
- [27] Metzger J P, Décamps H. The structural connectivity threshold: An hypothesis in conservation biology at the landscape scale. Acta Oecological, 1997, 18(1): 1-12.
- [28] Riitters K H, Wickham J D, O'Neill R, Jones B, Smith E. Global-scale patterns of forest fragmentation. Conservation Ecology, 2000, 4(2): 3-3.
- [29] Riitters K H, Wickham J D, O'Neill R V, Jones K B, Smith E R, Coulston J W, Wade T G, Smith J H. Fragmentation of continental United States forests. Ecosystems, 2002, 5(8): 0815-0822.
- [30] Civco D L, Hurd J D, Wilson E H, Arnold C L, Prisloe M P. Quantifying and describing urbanizing landscapes in the northeast United States.

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68(10): 1083-1090.

- [31] 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.
- [32] Vogt P, Ritter K H, Iwanowski M, Estreguil C, Kozakd J, Soillee P. Mapping landscape corridors. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 481-488.
- [33] 李锋, 王如松. 城市绿色空间服务功效评价与生态规划. 北京: 气象出版社, 2006.
- [34] 李二森,张保明,宋丽华,余文杰,唐德瑾.线性混合模型的光谱解混算法综述.测绘科学,2011,36(5):42-44.
- [35] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才. 基于亚像元分解的不透水表面与植被覆盖空间分异测度——以深圳市为例. 资源科学, 2009, 31(2): 257-264.
- [36] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [37] Lu D S, Weng Q H. Spectral Mixture Analysis of the Urban Landscapes in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(9): 1053-1062.
- [38] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. Remote Sensing of Environment, 2004, 93 (4): 480-492.
- [39] 张小飞, 王仰麟, 吴健生, 李卫峰, 李正国. 城市地域地表温度-植被覆盖定量关系分析——以深圳市为例. 地理研究, 2006, 25(3): 369-377.
- [40] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 谢苗苗, 李猷. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例. 地理学报, 2011, 66(7): 961-971.
- [41] Riitters K H, Vogt P, Soille P, Kozak J, Estreguil C. Neutral model analysis of landscape patterns from mathematical morphology. Landscape Ecology, 2007, 22(7): 1033-1043.
- [42] 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, 2007.
- [43] 贾宝全. 基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析. 生态学报, 2013, 33(5): 1654-1666.
- [44] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [45] Ostapowicz K, Vogt P, Riitters K H, Kozak J, Estreguil C. Impact of scale on morphological spatial pattern of forest. Landscape Ecology, 2008, 23 (9): 1107-1117.
- [46] Chang Q. Green Landscape Changes and Typical Ecological Responses in Urban Areas: A Case in Shenzhen [D]. Beijing: Peking University, 2008.
- [47] Chang Q, Li M X, Li X, Wu J S. A RS-based gradient analysis of vegetation spatial temporal changes in Shenzhen City, China // International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing: IEEE, 2011: 29-32.
- [48] 王富海. 深圳城市空间演进研究 [D]. 北京: 北京大学, 2003.
- [49] 乌日汗,温小荣,赵海霞,佘光辉.基于 RS 和 GIS 的深圳特区绿地景观动态分析及预测.北京林业大学学报,2010,32(6):42-47.
- [50] 王如渊. 深圳城市空间形态演变及其影响因素. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 385-390.
- [51] 华中,牛慧恩.城市化水平测度方法与实证研究——以深圳市特区外地区为例.城市规划,2003,27(11):34-38.
- [52] 尹强, 王佳文, 吕晓蓓. 新型城市发展观引领深圳城市总体规划. 城市规划, 2011, 35(8): 72-76.
- [53] 卜心国, 王仰麟, 吴健生. 深圳快速城市化中地形对景观垂直格局的影响. 地理学报, 2008, 63(1): 75-82.
- [54] 武剑锋, 曾辉, 刘雅琴. 深圳地区景观生态连接度评估. 生态学报, 2008, 28(4): 1691-1701.
- [55] 吴健生,刘洪萌,黄秀兰,冯喆.深圳市生态用地景观连通性动态评价.应用生态学报,2012,23(9):2543-2549.
- [56] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [57] 聂娟, 王薇, 张宝军. 深圳市土地覆盖格局空间变化研究. 国土资源遥感, 2009, 21(3): 84-87.