

# 城市化发展对森林景观连接度的影响 ——以山东半岛东部地区为例

孟 灵<sup>1,2</sup>, 闫淑君<sup>3</sup>, 卢清水<sup>1</sup>, 毕晓丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 福建农林大学园林学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 城市化导致森林景观连通性降低, 进而影响到森林生态系统中某些关键的生态过程。以山东半岛东部地区 13 个中小城市为例, 以 1990 和 2006 年 TM 遥感影像为数据源, 基于图论理论, 用森林景观概率连接度指数(PC) 和斑块相对重要性指数(dPC) 累积值, 来研究不同城区森林景观连通性的时空变化规律, 并以城市面积和道路建设为驱动因素, 数量化分析城市发展对森林景观连通性的影响。结果表明, 城市面积扩张和道路建设急剧降低了森林景观连通性。这种连通性的降低对拟合的中尺度生态过程产生重要影响。另外, 森林景观连接度对于城市化响应的敏感性远大于森林面积。因此, 景观连接度可以很好地用来监测和评估城市化发展对于森林景观及生态过程的影响。

**关键词:** 城市化效应; 森林景观; 连通性指数; 城市面积; 道路

**中图分类号:** Q149      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-389X(2012)04-0289-07

## Assessment of urbanization effects on forest landscape connectivity —Taking the Eastern Shandong Peninsula, China as a case

MENG Ling<sup>1,2</sup>, YAN Shu-jun<sup>3</sup>, LU Qing-shui<sup>1</sup>, BI Xiao-li<sup>1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** Urbanization has substantially reduced forest landscape connectivity worldwide, which affected some critical ecological processes in forest ecosystems. The urbanization effects on forest landscape connectivity were assessed from 1990 to 2006 in the Eastern Shandong Peninsula, China. The layers of urbanization factors (city area and road) and forest landscape were obtained from TM images and historical data. The probability of connectivity (PC) and the importance of an existing node for maintaining landscape connectivity (dPC), based on the graph theoretical method, was used to quantify the changes in forest landscape connectivity. City area and road building were used as the forcing factor to analyze the urbanization effect on the forest landscape connectivity quantitatively. The results showed that the development of city and road has greatly decreased the forest landscape connectivity in city level. Subsequently, the reduction of connectivity has greatly influenced the ecological processes of medium movement ability. The results also showed that urbanization factors have affected forest landscape connectivity more significantly than forest area. Therefore, the probability of connectivity can be properly used to monitor and evaluate the urbanization effect on the forest landscape and the ecological process.

**Key words:** urbanization effects; forest landscape; connectivity index; urban area; road

景观连接度指景观促进或阻碍生物体或某种生态过程在源斑块间运动的程度<sup>[1]</sup>, 是景观生态学研究的主要内容之一, 对种子迁移和扩散<sup>[2]</sup>、基因流动<sup>[3]</sup> 以及干扰渗透<sup>[4]</sup> 等生态过程具有重要影响, 是维护自然生态系统完整性<sup>[5]</sup> 和稳定性的重要因素<sup>[6]</sup>。景观连接度自 1984 年首次被应用在景观生态学后, 鉴于其对破碎景观中动植物栖息地和物种保护等方面的重要指导意义, 在景观生态学领域得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。森林作为一种典型的自然生态系统, 具有保持水土、涵养水源、净化空气等多种生态功能。森林资源状况及其消长变化, 不仅威胁生物多样性, 而且还影响地区乃至全球环境的变化<sup>[9]</sup>。由于景观连接

收稿日期: 2012-02-09      修回日期: 2012-04-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-224)。

作者简介: 孟灵(1987-), 女, 硕士研究生, 从事景观生态学研究。E-mail: lmeng@yic.ac.cn。通讯作者毕晓丽(1976-), 女, 副研究员, 从事景观生态学研究。

度在揭示景观结构特征、生态学过程和功能等方面具有独特优势<sup>[10]</sup>,近几年被国内外学者广泛应用于森林景观变化的研究<sup>[11-15]</sup>。

改革开放以来,中国城市化进入了快速发展阶段,城市化平均速度是世界同期城市化水平的2倍<sup>[16]</sup>。过去的20 a里,我国中小城市的数目从3 000个增加到19 216个,此外,还有5 000多个小乡镇以快速的步伐步入城市队伍<sup>[17-18]</sup>。城市化水平的提高,会带来很多生态问题,其中城市化对森林的影响是当前生态研究的热点问题。快速的城市化迅速改变原有自然景观,不可逆地减少森林面积,改变森林景观格局和相应的生态过程<sup>[19-22]</sup>。城市建设用地和道路是城市化过程的主导景观特征,且在遥感影像上特征明显,便于与其它地物区分和提取。因此,文中仅从道路、城市面积角度研究其对森林景观连接度的影响,初步探求城市化对于森林景观的作用过程,同时也为城市规划和景观格局优化提供理论依据。

以往对于森林景观连接度的研究大都基于单个城市某一特定时段<sup>[12-23]</sup>,而从监测的角度来讲,此类研究难以反映森林连接度的动态变化趋势,同时单个城市范围也限制了我们对森林连接度变化的尺度效应的理解。因此,文中尝试探讨山东半岛地区13个中小型城市森林景观连接度的时空变化,分析城市化进程对森林景观连接度的影响,探求城市化过程的不同因素(如城市扩张和道路建设)对于森林连接度的作用,评估城市森林连接度的动态变化趋势,为区域森林资源保护和城市景观规划提供理论参考。

### 1 研究区概况

山东半岛城市群位于我国东部沿海地区,是环黄渤海经济圈的重要组成部分。该地区是中国参与环黄海区域经济合作的领头军之一,为中国经济板块乃至将东北亚地区极具影响力的经济隆起地带<sup>[24]</sup>。改革开放以来,随着我国城市化战略的实施,山东半岛城市化进程明显加快。过去20 a里,山东半岛地区中小城市和城镇面积急速扩张,快速城市化加剧了自然资源保护与社会经济发展的冲突。

笔者选择森林覆盖度较高、森林分布相对连续的烟台、威海2个中型城市以及毗邻的11个县级市为研究对象,研究区面积18 648 km<sup>2</sup>(图1)。其中,牟平县虽然在1994年行政区划上属于烟台市区,但是为了方便分析,将其单独列出。同时,为了简化研究区森林景观连通性分析问题,岛屿森林面积忽略不计。

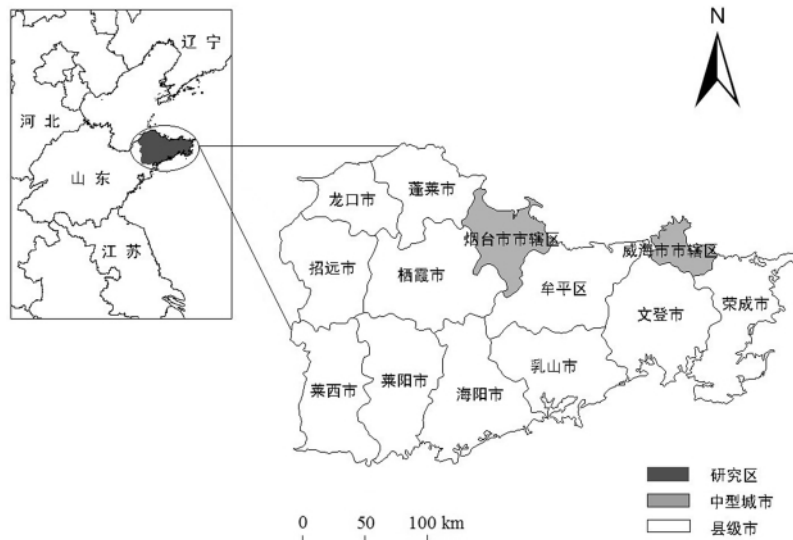


图1 研究区分布

Figure1 Location of the study area

### 2 研究方法

#### 2.1 数据处理

以1999和2006年TM遥感影像为基础数据,两景影像时相分别为1990年6月17日和2006年7月28日;两景影像的轨道号分别为119/34和120/34。利用遥感处理软件ENVI对影像进行几何校正、拼接、彩色合成等处理。利用ARCGIS软件结合山东省土地利用现状图采用目视解译提取研究区内城镇和森林

面积分布图,并利用搜集到的土地利用数据进行精度校正。道路矢量数据源于数字化的1990年代、2000年代山东省交通图。道路要素分为高速公路、国道、省道和乡村公路4类。

基于生境可利用性的观点和森林斑块所在区域自身特点,选择面积大于25 hm<sup>2</sup>的森林斑块作为源斑块,用以分析森林景观连通性的变化<sup>[12-25]</sup>。

## 2.2 森林景观连接度分析

2.2.1 景观指数分析 (1) 景观连接度指数和最小耗费距离: 衡量景观连接度的指数有很多,文中采用基于图形理论的景观连接度计算方法,即概率连接度指数(the probability of connectivity, PC)来分析城市森林景观的时空动态变化。PC是能直接反应景观结构动态变化,并与生态过程密切联系的功能连接度指数<sup>[26]</sup>。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (1)$$

式中:  $n$  表示景观中斑块总数;  $a_i$  和  $a_j$  分别表示斑块  $i$  和  $j$  的面积(m<sup>2</sup>);  $A_L$  是整个景观的面积;  $p_{ij}^*$  为斑块  $i$  和  $j$  之间所有可能的路径中的最大迁移概率。 $p_{ij}$  由以下的指数函数计算得出。

$$p_{ij} = e^{-\theta d_{ij}} \quad (2)$$

式中:  $p_{ij}$  为斑块  $i$  和  $j$  之间的迁移概率;  $d_{ij}$  是两斑块之间的最小耗费距离;  $\theta$  为常数,指连接度与耗费距离的模拟系数,由距离以及迁移扩散概率的赋值确定。

为有效地度量城市化过程对于森林景观连接度的影响,笔者在计算 PC 指数时使用基于最小费用模型<sup>[27]</sup>的费用距离替代传统的欧式距离。基于源栅格与阻力栅格 2 个图层,利用 GIS 软件空间分析中的费用距离模块循环计算,即可获得费用距离栅格图层。其中,“源”图层(森林斑块)是用作计算费用距离的图层<sup>[28-29]</sup>,阻力层则主要包含景观要素的地理位置、方位以及各景观要素对物种扩散的阻力系数<sup>[30]</sup>。

文中主要引入道路图层、城镇图层和坡度图层作为景观要素阻力层<sup>[27,31-32]</sup>。对于道路图层,按照道路类型日交通量和影响范围的大小,对高速公路、国道、省道和乡村公路 4 种道路类型分别建立 1 000、500、250 和 100 m 的缓冲区。然后,对城镇图层和所获得的道路缓冲区图层根据以往相关研究和区域景观性质赋予不同的阻力值,各等级道路阻力值为 8,城镇阻力值为 6<sup>[17]</sup>。同时,参照 Fu et al<sup>[12]</sup>的研究结果,将由高程数据获得的坡度图层按照 0-0.2、0.2-0.4、0.4-0.6、0.6-0.8、0.8-1.0 五个坡度等级,依次赋阻力值为 1、2、3、4、5。将以上阻力值图层叠加,转化为 30 m × 30 m 的栅格图层来计算费用距离。

利用软件 Conefor Sensinode 2.2 实现森林景观连通性指数的计算<sup>[33]</sup>。斑块连通性的计算与不同生态过程发生的尺度相关,譬如种子的扩散过程<sup>[23]</sup>。因此,在计算中需要设定不同的距离阈值以代表不同尺度生态过程。根据 Fu et al<sup>[12]</sup>的研究结论和研究区范围本身特点,笔者设定 1、5、10 和 25 km 四个距离阈值,距离阈值斑块之间连通的可能性  $p_{ij}$  值设定为 0.5<sup>[23,26]</sup>。

(2) 斑块相对重要性指数: 斑块相对重要性指数(the importance of an existing node for maintaining landscape connectivity,  $dI$ )用以衡量景观中源斑块的功能,并识别对景观连通性具有重要作用的斑块<sup>[23,26]</sup>。

$$dI/\% = \frac{I - I'}{I} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $I$  为某一景观的连接度指数值;  $I'$  为去除任意斑块后由其他斑块所组成景观的连接度指数。 $dI$  是一个通用公式,可以计算多个指数,文中利用 PC 指数进行计算,具体公式为:

$$dPC/\% = \frac{PC - PC'}{PC} \times 100 \quad (4)$$

$dPC$  指数的计算也在 Conefor Sensinode 2.2 软件中实现,在获取以上 2 组指数后,分别计算 1990 和 2006 年各个城市 PC 值和森林斑块  $dPC$  累加值,以监测单个城市范围内森林景观连接度和森林斑块重要性的动态变化。

2.2.2 城市化对森林面积和森林景观连接度的影响 将各个城市面积和道路长度与森林面积、森林景观连接度进行相关性分析,研究城市化因素对森林景观连通性的影响。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市面积、道路长度与森林面积的变化

研究区总的城市面积由 1990 年的 264.17 km<sup>2</sup> 增长至 2006 年的 1 011.04 km<sup>2</sup> (增长 282.7%)。道路总长度从 5 038.55 km 到 6 631.74 km (增长 31.62%)。由于道路和城市面积扩展占用导致森林面积减少了 71.03 km<sup>2</sup>。

1990 - 2006 年间,烟台市辖区城市面积增长最快,其次是威海市、莱西市、荣城市和龙口市。道路总长度的增长以文登市最高,其次是烟台市、牟平市、莱西市和龙口市。与之相对应的是,烟台市、牟平市、威海市和文登市的森林面积减小得较其他城市快(表 1)。

表 1 1990 - 2006 年城市面积、道路长度与森林面积变化

Table 1 Changes of urban area, road and forest reduction due to urbanization from 1990 to 2006

城市	城市扩张		道路增长		城市化下的森林减少	
	面积/km <sup>2</sup>	增长率/%	长度/km	增长率/%	面积/km <sup>2</sup>	减小率/%
海阳	21.89	329.17	53.63	10.62	1.02	0.56
莱西	79.59	495.27	157.69	38.02	0.12	0.36
莱阳	41.75	260.12	50.26	13.59	1.25	1.65
龙口	58.42	222.04	132.97	49.39	0.08	0.03
牟平	41.42	551.53	188.29	40.82	16.32	5.19
蓬莱	39.98	281.55	64.75	16.53	0.05	0.03
荣城	72.68	512.91	90.10	17.31	2.66	1.81
乳山	43.09	687.24	56.59	11.17	1.60	0.75
威海	94.98	281.76	76.38	70.25	16.00	13.16
文登	55.89	456.99	295.93	52.77	8.49	4.15
栖霞	14.79	158.86	84.95	24.42	3.77	0.66
烟台	149.15	159.57	232.87	77.27	18.43	8.31
招远	33.24	404.38	108.78	38.66	1.31	0.69

#### 3.2 研究区森林景观连通性分析

各个城市 1990 - 2006 年间森林连接度均呈现不同程度的下降趋势。在 1、5、10 和 25 km 四个距离阈值下,各城市 PC 减小幅度分别在 0.21% - 25.94%、0.4% - 47.26%、1.16% - 48.00%、1.22% - 47.19% 之间。其中文登市、烟台市、威海市、莱西市、龙口市和栖霞市 6 个城市 PC 减小幅度最大,均在 10% 以上。总体上来说,距离阈值为 5 和 10 km 时 PC 的减小幅度大于 1 和 25 km。随着距离阈值的增大,PC 空间异质性降低。当距离阈值为 1 km 时,烟台市 PC 减小幅度最大,约为 25.94%。而当距离阈值设定为 5、10 和 25 km 时,文登市却表现为 PC 急剧减小的现象,减小幅度分别为 47.26%、48.00% 和 47.19% (图 2)。

同样在 1、5、10 和 25 km 四个距离阈值下,各城市 dPC 总和减小幅度分别处在 (-22.26%) - 4.34%、(-18.27%) - 6.45%、(-10.43%) - 5.12%、(-6.36%) - 4.85% 范围内。威海市、烟台市、牟平市、文登市和荣城市 5 个城市内森林斑块重要性降低。与 PC 指数一样,dPC 指数也呈现出随着距离阈值的增大,空间异质性减小的现象(图 3)。

#### 3.3 不同城市化因子对于森林面积与森林景观连接度作用分析

线性相关分析结果(表 2)表明,城市面积的增加可以解释 36% 的森林面积的减少,而道路长度的增加对森林面积减少则起到 27% 的作用。当研究城市扩张和道路建设对森林景观的影响时,PC 值变化幅度强于森林面积的变化。研究不同城市化因子(城市扩张和道路建设)对不同距离阈值下的森林景观连接度的影响时,距离阈值为 1 km,PC 值的变化最好从城市面积变化的角度考虑,而道路建设则能更好地解释较大生态尺度过程 PC 值的变化(表 2)。

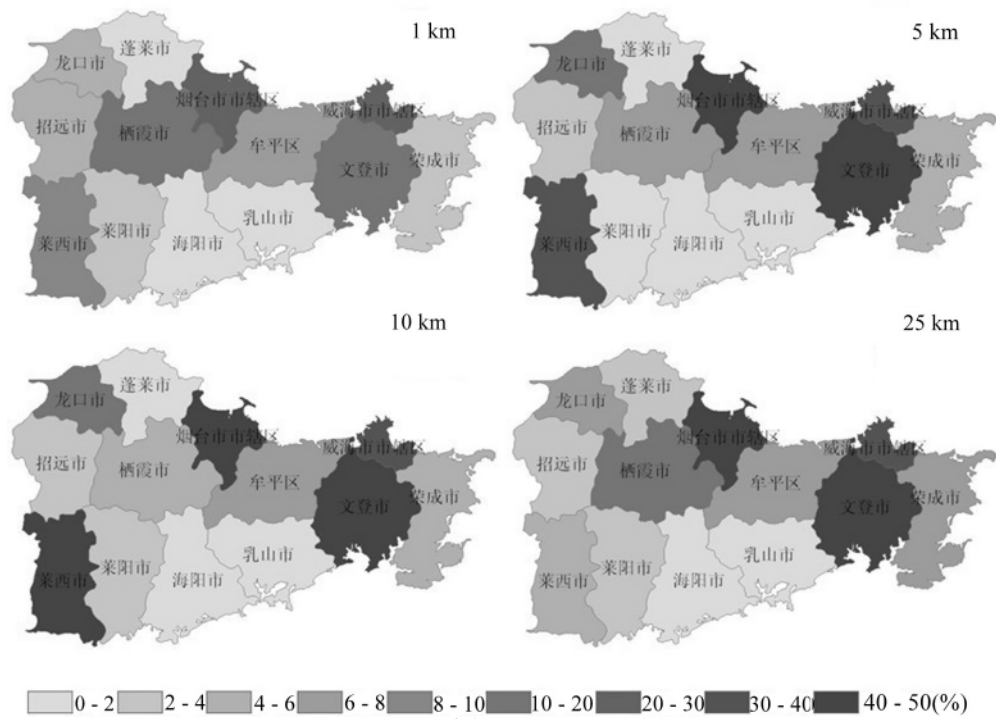


Figure 2 The decrease of  $PC$  under different ecological processes

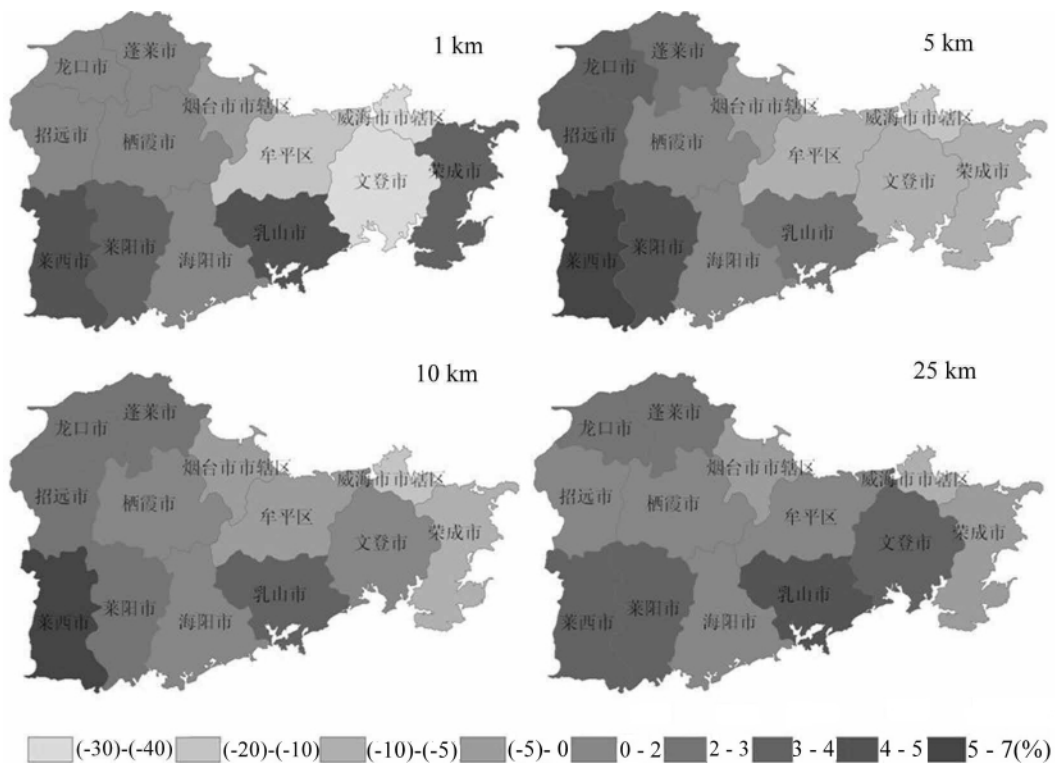


Figure 3 The decrease of  $dPC$  under different ecological processes

表 2 不同生态过程下森林面积和  $PC$  值变化与城市化因子线性相关分析<sup>1)</sup>

Table 2 Linear correlation coefficients between urbanization factors with forest area changes and  $PC$  changes for different ecological processes

相关系数	森林面积	$PC-1\text{ km}$	$PC-5\text{ km}$	$PC-10\text{ km}$	$PC-25\text{ km}$
城市面积	0.36	0.61	0.51	0.45	0.41
道路长度	0.27	0.31	0.58	0.57	0.45

<sup>1)</sup>  $n = 13$ .

## 4 结论与讨论

城市化过程使得适合动植物生存的自然生境逐渐被建筑物、水泥路面以及其它一些城市基础设施所替代<sup>[34]</sup>,从而导致自然生境破碎化现象严重。生境的破碎化使得景观连通性降低,严重破坏了生物栖息地的原有格局,影响到生物体迁移扩散等生态学过程<sup>[35]</sup>。结果表明,研究区内任一城市内森林景观连接度在过去 10 a 里均呈减少的趋势。城市化过程(尤其是道路基础设施)严重抑制了中尺度的生态过程,如当将生物可迁移扩散距离设定为 5 和 10 km 时连通性的急剧衰减(图 2、表 2)。文中研究结果与 Fu et al<sup>[12]</sup>研究结果一致,城市道路严重影响了中尺度(距离阈值为 8 km)生物生态过程。

城市内森林景观连接度变化特征在一定程度上受城市发展规模的影响。中型城市中森林连通性的变化幅度要远远大于县级城市,如烟台和威海市森林面积和连接度变化率比其他县级城市大(图 2)。同样,在小城市中,处于快速城市化阶段的文登和莱西市内森林连接度急剧减小,两个城市连接度的锐减主要归因于大规模的道路建设。同样通过森林面积变化率结果可以看出森林面积变化率的分布可以较好的反映不同城市的城市化水平高低(表 1)。

森林景观连通性的重要值和连接度一样,也表现出较强的空间异质性(图 3)。烟台市和威海市两城市由于城市化效应导致森林斑块在整个研究区生境内重要性的降低。研究区内各个城市的  $PC$  和  $dPC$  的变化趋势大抵一致。但是,莱西市内森林斑块  $dPC$  却没随着  $PC$  值的降低而降低,而是一直保持很高的重要性。这可能跟城市原有森林斑块重要值较高有关。

城市化作用下的森林景观破碎化现象在全球范围内不断恶化。20 世纪以来绝大部分城市步入快速城市化进程阶段,城市建筑物和道路等基础设施建设改变森林景观,城市化对森林景观的影响在一定程度上超过了曾经对森林景观变化起决定性作用的另一主要人类活动——农业开发和伐木业<sup>[36]</sup>。以往关于城市森林景观研究大多是城市化作用下林地转换为其他土地利用方式,即森林面积变化的研究<sup>[37]</sup>。文中的结果却证明城市化对于景观连通性作用强度远大于面积变化。例如,莱西市在城市化作用下,森林面积变化不大,但森林景观连接度指数却减少了很多(图 2、表 2)。因此,笔者认为基于景观连接度研究城市化过程对于森林景观作用效果在一定程度上要优于基于森林面积变化的研究。同时,对于城市森林景观连接度的研究也为中小型城市林地建设规划提供一定理论指导,尽可能的优化城市森林景观格局,提高森林景观连通性。

文中利用概率连接度指数( $PC$ )和重要值( $dPC$ )研究城市化过程对于森林景观的变化影响。城市面积扩张和道路建设降低了森林景观连接度。 $PC$ 和 $dPC$ 空间分布异质性显著,证明城市化对于森林景观作用与城市规模大小相关,对于中型城市作用远大于小型城市。不同因素对于森林景观作用会反馈到不同尺度的生态过程,如城市扩张主要影响小尺度的生态过程,而道路建设则对大尺度生态过程产生重要影响。同时,森林连接度对于城市化过程响应的敏感程度大于森林面积。因此,景观连通性可作为衡量城市化生态效应的重要指标。

## 参考文献

- [1] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure [J]. *Oikos*, 1993, 68(3): 571–573.
- [2] Grashof-Bokdam C J, Jansen J, Smulders M J M. Dispersal patterns of *Lonicera periclymenum* determined by genetic analysis [J]. *Molecular Ecology*, 1998, 7(2): 165–174.
- [3] Green D G. Connectivity and complexity in landscapes and ecosystems [J]. *Pacific Conservation Biology*, 1994, 1(3): 194–200.
- [4] Turner M G, Gardner R H, Dale V H, et al. Predicting the spread of disturbance across heterogeneous landscapes [J]. *Oikos*, 1989, 55(1): 121–129.
- [5] Collinge S K. Spatial arrangement of habitat patches and corridors: clues from ecological field experiments [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42(2–4): 157–168.
- [6] Crist M R, Wilmer B, Aplet G H. Assessing the value of roadless areas in a conservation reserve strategy: biodiversity and landscape connectivity in the northern Rockies [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(1): 181–191.
- [7] Forman R T, Baudry J. Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology [J]. *Environmental Management*, 1984, 8(6): 495–510.
- [8] Wu J G, Vankat J L, Barlas Y. Effects of patch connectivity and arrangement on animal metapopulation dynamics: a simulation study [J]. *Ecological Modelling*, 1993, 65(3–4): 221–254.

- [9] 杨俊. 基于 ETM + 遥感影像的森林覆盖面积提取方法的研究——以南京市为例[D]. 南京: 南京农业大学工学院, 2006: 1 - 52.
- [10] 朱彦鹏, 迟德富, 张星耀. 景观连接度在森林病虫害控制中的应用[J]. 世界林业研究, 2009, 22(3): 52 - 57.
- [11] Pascual-Hortal L, Saura S. Integrating landscape connectivity in broad-scale forest planning through a new graph-based habitat availability methodology: application to capercaillie (*Tetrao urogallus*) in Catalonia (NE Spain) [J]. European Journal of Forest Research, 2008, 127(1): 23 - 31.
- [12] Fu W, Liu S L, Degloria S D, et al. Characterizing the “fragmentation-barrier” effect of road networks on landscape connectivity: a case study in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(3): 122 - 129.
- [13] 张大旭, 唐向阳, 侯碧青. 景观连接度在株洲市绿地系统建设中的应用研究[J]. 湖南林业科技, 2005, 32(2): 42 - 44.
- [14] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2 237 - 2 244.
- [15] 刘常富, 周彬, 何兴元, 等. 沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2 508 - 2 516.
- [16] 周一星, 曹广忠. 改革开放 20 年来的中国城市化进程[J]. 城市规划, 1999, 23(12): 8 - 12.
- [17] Lu H F, Campbell D E. Ecological and economic dynamics of the Shunde agricultural system under China's small city development strategy[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2 589 - 2 600.
- [18] Lu Q S, Liang F Y, Bi X L, et al. Effects of urbanization and industrialization on agricultural land use in Shandong Peninsula of China[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(6): 1 710 - 1 714.
- [19] Andrews A. Fragmentation of habitat by roads and utility corridors: a review[J]. Australian Zoologist, 1990, 26(3-4): 130 - 141.
- [20] Collinge S K. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1): 59 - 77.
- [21] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach[J]. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1-3): 179 - 193.
- [22] Walker R, Craighead L. Analyzing wildlife movement corridors in Montana Using GIS[EB/OL]. [2008-01-20]. <http://gis.esri.com/library/user-conf/proc97/proc97/to150/pap116/p116.htm>.
- [23] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2-3): 91 - 103.
- [24] 张海峰. 山东半岛城市群生态环境与经济协调发展模式研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 1 - 174.
- [25] Pascual-Hortal L, Saura S. Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2-3): 176 - 186.
- [26] 富伟, 刘世梁, 崔保山, 等. 景观生态学中生态连接度研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6 174 - 6 181.
- [27] 李纪宏, 刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 219 - 224.
- [28] Adriaensen F, Chardon J P, De Blust G, et al. The application of ‘least-cost’ modelling as a functional landscape model[J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(4): 233 - 247.
- [29] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8 - 15.
- [30] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 基于最小费用模型的景观连接度评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 2 042 - 2 048.
- [31] Singleton P H, Gaines W L, Lehmkuhl J F. Landscape permeability for Large Carnivores in Washington: a geographic information system weighted-distance and least-cost corridor assessment[EB/OL]. [2008-10-15]. <http://rewilding.org/Singleton1.pdf>.
- [32] Epps C W, Wehausen J D, Bleich V C, et al. Optimizing dispersal and corridor models using landscape genetics[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(4): 714 - 724.
- [33] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity[J]. Environmental Modeling and Software, 2009, 24(1): 135 - 139.
- [34] Kendle T, Forbes S. Urban Nature Conservation[M]. London: Chapman and Hall, 1997: 1 - 345.
- [35] Saunders D A, Hobbs R J, Margules C R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review[J]. Conservation Biology, 1991, 5(1): 18 - 32.
- [36] Marzluff J M, Ewing K. Restoration of fragmented landscapes for the conservation of birds: A general framework and specific recommendations for urbanizing landscapes[J]. Restoration Ecology, 2001, 9(3): 280 - 292.
- [37] Xu X G, Peng H F, Xu Q Z, et al. Land changes and conflicts coordination in coastal urbanization: a case study of the Shandong Peninsula in China[J]. Coastal Management, 2009, 37(1): 54 - 69.

(责任编辑: 温凤英)