基于 GIS 的上海市景观格局梯度分析

张利权 吴健平 甄 束 炯

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室 地理信息教育部开放实验室 上海 200062)

摘 要 定量分析景观格局及其变化对于监测和评价城市化的生态后果十分重要。该研究应用基于 GIS 的梯度分析与景观指数相结合的方法定量分析了上海市城市化的空间格局。沿一条自西向东 64 km 长 6 km 宽和另一条自南向北 66 km 长 6 km 宽的样带,应用移动窗口计算了一系列景观指数。结果表明,城市化的空间格局可以用梯度分析与景观指数来定量,不同的土地利用类型沿景观格局梯度确实表现出明显的“空间特征”。多项景观指数可准确地、定量地指示上海地区东西和南北发展轴线上城市化的前沿和城市景观梯度分异的特征。城市化的总体格局是随着城市化程度增加,景观在组分上更多样化,形状上更为复杂以及生态学上更破碎化。此外,该文显示的上海市城市化景观格局比较符合同心圆论的城市发展理论,研究结果支持斑块密度随城市化程度而增加,斑块大小和景观连接度则下降的假说,但与随人类干预程度增强,斑块形状变得更规则的假说不相符和,因此,需要进一步研究来证实该发现。

关键词 城市化 梯度分析 景观格局 景观指数

A GIS-BASED GRADIENT ANALYSIS OF THE URBAN LANDSCAPE PATTERN OF SHANGHAI METROPOLITAN REGION

ZHANG Li-Quan WU Jian-Ping ZHEN Yu and SHU Jiong

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Open Laboratory of Geographical Information Science of Education Ministry of China, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract Urbanization is arguably the most dramatic form of land transformation that profoundly influences natural environment, biological diversity and human life. Understanding the causes, processes, and consequences of land use and land cover change is essential in ecology as well as in landscape and urban planning, and urbanization represents the extreme form of land transformation. Quantifying landscape pattern and its change is essential for the monitoring and assessment of the ecological consequences of urbanization.

As the largest city in the country, metropolitan Shanghai is now the fastest growing area among all major Chinese cities that have more than 13 million residents. Using the 1994 GIS-based land use data set and combining gradient analysis with landscape metrics, we attempted to quantify the spatial pattern of urbanization in the Shanghai metropolitan area. Seventeen landscape metrics were computed along a 64 km long and 6 km wide west-east transect and another 66 km long and 6 km wide south-north transect, crossing at the urban center, with a moving window. The research was designed to address two questions: 1) do different land use types have their own unique spatial signatures (e.g., the shape of the change curve along an urban-rural transect)? 2) can urbanization gradients be detected using landscape pattern analysis?

The results of transect analysis with landscape-level metrics showed that the spatial pattern of urbanization could be reliably quantified using landscape metrics with a gradient analysis approach, and the location of the urbanization center could be identified precisely and consistently with multiple indices of the 17 landscape metrics used in this study. Urbanization in the metropolitan Shanghai region has resulted in dramatic increases in patch density, edge density, and patch and landscape shape complexity, and sharp decreases in the largest and mean patch size, agriculture land use type, and landscape connectivity. The general pattern of urbanization was that the increasingly urbanized landscape became compositionally more diverse, geometrically more complex, and ecologically more fragmented. Although some of these changes were discernable visually from the land use maps, landscape metrics provided a useful way of quantifying these changes so that they could be further used to relate ecological patterns and processes in this urban landscape.

In addition, our results supported a series of hypotheses on landscape structural responses along a human modification gradient: that, with increasing urbanization, patch density increases while patch size and landscape connectivity decrease. However, our results on patch shape seemed to disagree with the hypothesis that

patch shape becomes more regular as human modification to landscapes intensifies. Our interpretation is that, when the degree of urbanization is high, not only the density, but also the shape complexity, of patches will increase. Future studies are needed to further confirm these findings.

Key words Urbanization, Gradient analysis, Landscape pattern, Landscape metrics

就全球而言,城市化趋势正在不断加速。19 世纪以前,全球只有百分之几的人口居住在城市,而当今的城市已居住了全球人口的 50% 左右。到 2001 年底,中国城镇化水平已达到 37.7 %。据最新发布的报告预测(《中国城市发展报告》编委会,2002),到 2050 年,中国的城市化率将提高到 75 % 以上。城市是以人类为主体的自然-社会-经济复合生态系统。毫无疑问,城市生态学研究对于认识并解决由于全球城市化加速和城市发展过程中出现的一系列问题,如人口膨胀、资源紧缺、城市布局调整、环境污染等,具有重要意义(朱伟兴等,2002;Zipperer *et al.*, 2000)。城市生态学有多种途径来研究和理解城市系统的结构、功能和动态。其中,生态系统生态学途径注重于城市生态系统中的能流、物流、信息流和生物种类的研究,而城市景观生态研究途径注重于景观中空间异质性的产生以及这些异质性是怎样影响城市生态系统中的能流、物流、信息流和生物种类等生态学过程的(Kent *et al.*, 1999;朱伟兴等,2002)。定量分析景观格局及其变化对监测和评价城市化的生态后果十分重要(Pickett *et al.*, 1997;2001;Whitford *et al.*, 2001)。进入 20 世纪 90 年代以来,上海城市现代化进程不断加快,成为我国经济体系中最具实力、活力和开放性的增长核,其发展前景十分广阔。但与此同时,上海在城市化的进程中已出现了短期的高密度投入、人口剧增、产业聚集、郊区迅速城市化、建筑密度和容积率增高的高强度开发特征,给城市的可持续发展带来极大的挑战。

由 Whittaker(1975)用于植被分析所发展的梯度分析(Gradient analysis)曾被用于研究城市化对植物分布(Kowarik, 1990; Sukopp, 1998)和生态系统(McDonnell & Pickett, 1990)的影响。同时,近十几年来景观生态学中用于景观格局和动态分析的景观指数已得到广泛应用(傅伯杰等,1996;Kowarik, 1990;Wu *et al.*, 2000;肖笃宁,1999;肖笃宁等,1990;曾辉等,2002)。但它们在城市生态学研究中的应用还较少(Luck & Wu, 2002)。该项研究以城市景观生态学为途径,应用基于 GIS 的梯度分析与景观格局分析相

结合的方法定量分析上海市城市景观格局及其变化规律。研究的主要问题是:1)不同的土地利用类型是否具有独特的空间特征?2)各景观指数在城市化梯度中是如何变化的?研究结果对进一步研究城市格局与过程的相互关系以及监测与评价城市化过程具有重要意义。

1 研究地区和方法

1.1 研究地区

上海为我国直辖市之一,位于 30°23' ~ 31°37'N, 120°50' ~ 121°45'E 之间,面积 6 340 km²,人口 1 350 万(2000 年)。本项研究的主要信息源为 1994 年 154 张 1:6 000 的 IR/Color 航空遥感影像(资料来源:上海市航空遥感办公室),航空遥感影像的解译采用建设部 1991 年颁布的国家标准 GBJ137-90《城市用地与规划建设用地标准》中的“城市用地分类”体系,经地理底图制作、野外验证和要素转绘等步骤绘制而成上海市城市土地利用图(1994 年)。在上述步骤的基础上,通过数字化仪在 PC ARC/INFO 支持下进行数字化,得到数字化电子地图和相应的土地利用数据库并编纂在 PC ArcView GIS 上(图 1)¹⁾。

1.2 研究方法

为便于进行景观格局分析,先将原数据中 16 种土地利用类型重新归并成 7 类:居住区、工业区、城市其它建设用地、农业用地、待建用地、道路用地和水体(表 1),随后用 ESRI 的 ArcView Spatial Analyst 将矢量数据转换成栅格数据(栅格大小 10 m × 10 m)。为检测上海市景观格局的城市化梯度,设立了经市中心人民广场的自西向东(W ~ E)和自南向北(S ~ N)横贯上海市的样带进行梯度分析(图 1)。每条样带具 3 行邻接行组成,每行分别由 32 个和 33 个 2 km × 2 km 的样块组成(即 W ~ E 样带长 64 km, S ~ N 样带长 66 km)。

景观指数通常能够高度浓缩景观格局信息,其特征可以在单一斑块、斑块类型和景观 3 个层次上分析。在多数情况下,文献中所提到的景观格局包括非空间的组分(如斑块类型总面积 CA, 斑块数

1) The Institute of Remote Sensing and the Department of Geography, East China Normal University(华东师范大学遥感所、地理系). 1997. The study of remote sensing dynamics for the process and pattern of urbanization of Shanghai metropolitan region.(in Chinese)

NP 斑块密度 PD 边界密度 ED 斑块丰富度 PR , 多样性 SHDI 均匀性 SHEI 最大斑块指数 LPI 平均斑块大小 MPS 斑块大小标准差 PSSD 斑块大小变差系数 PSCV 等) 和空间的配置 (如景观形状指数 LSI 平均斑块形状指数 MSI 面积加权平均形状指数 AWMSI 平均斑块分维数 MPFD 面积加权平均分维数 AWMFD 和聚集度 CONT) (邬建国 2000) 。 我们

采用这种简单的分类以便分析结果的组织和解释。该项研究中景观水平上的景观指数用 FRAGSTATS (McGarigal & Marks ,1995)分析。分析时用一个规格为 3×3 (即 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$) 的重叠移动窗口 (图 1) 沿样带自西向东和自南向北滑动来计算景观指数。类似于求出时间系列的移动平均 , 此方法可以修匀许多由于小尺度和局部变差所引起的噪声。

图 1 上海市 1994 年基于 GIS 的土地利用图 , 自西向东样带 , 长 64 km , 宽 6 km ; 自南向北样带 , 长 66 km , 宽 6 km , 以及沿样带位于市中心处的重叠移动窗口 , 规格为 3×3 样块 (即 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$)

Fig.1 1994 GIS-based land use map of the Shanghai metropolitan area , the transects were west-east and south-north oriented , and 64 km long and 6 km wide and 66 km long and 6 km wide , respectively , as well as the moving window located at the city center along the transects , size 3×3 blocks (i. e. $6\text{ km} \times 6\text{ km}$)

表 1 土地利用类型的重分类
Table 1 Reclassification of the land use types

图例 Legend	重分类 Reclassification	面积 Area (km ²)	比例 (%) Percentage	原土地利用类型 The original land use types
A	居住区 Residence	157.6	2.5	居住区 Residence
B	工业区 Industry	203.3	3.2	工业区 Industry
C	农业用地 Agriculture	5 122.0	80.8	耕地 Agriculture
D	道路用地 Road	66.3	1.0	道路用地 Road
E	水体 Water	374.6	5.9	水体 Water
F	待建用地 Land for construction	66.0	1.0	待建用地 Land for construction
G	城市其它建设用 地 Other urban constructional land	354.9	5.6	广场、停车场 Square and parking 仓储用地 Storehouse 科教用地 Science and education 绿地 Green land 商业用地 Commerce 市政用地 Public utility 体育用地 Sport 文化娱乐用地 Recreation 医疗卫生用地 Hospital

图 2 上海地区景观概要特征
Fig.2 Synoptic landscape characteristics for Shanghai area
A ~ G 同表 1 See Table 1

2 结果与分析

2.1 上海市城市景观的基本特征

上海市(1994 年)的城市化程度是相当高的,按全市计算,居住用地占总面积的 2.5%,工业用地占 3.1%,其它建设用地占 5.6%,道路占 1.0%,待建

用地占 1.0%,农业用地占 80.8%,水体占 5.9%(图 2a)。整个景观的平均斑块大小为 103 hm²,斑块密度为 0.97 斑块·km⁻²。斑块密度从道路和农业用地逐渐向城市用地增加(图 2b)。与斑块类型相对面积的格局相似(图 2a),农业用地的最大斑块指数和平均斑块大小的值最高,表明其在城市外围占优

势和较低的景观破碎化,而城市用地(居住用地、工业用地、其它建设用地、道路和待建用地)的这些指数值则很低(图 2c、d),说明城区高度的景观破碎化。下面的样带分析结果将进一步证实这些解释。

2.2 景观格局沿样带的组分变化

景观层次上(综合了所有 7 种土地利用类型)沿自西向东和自南向北两条样带的组分变化分析结果如图 3。自西向东和自南向北两条样带显示了相似的格局,从上海市远郊到中心城区,斑块密度和斑块边界密度呈指数式增加,在市中心(约 0 km 处)达到最高值,此后随离市中心距离的增加而迅速下降(图 3a、b)。这些结果表明随着城市化程度提高,景观破碎化程度也急剧增加,城市远郊比较连续的农业景观逐渐为各种城市土地利用类型的斑块所替代。斑

块丰富度(即土地利用类型数)和多样性与均匀性指数也呈现相似的增加形式(图 3c、d、e),表明随着农业用地的比例减少、城市用地的比例增加以及土地利用类型数的增加,景观变得更破碎化以及各土地利用类型间的分布更均匀。而景观中最大斑块指数、平均斑块大小和斑块大小标准差向城市中心方向持续下降(图 3f、g、h),尤其在城区内特别明显,这是景观中斑块大小随着城市化程度增加而迅速下降的直接结果。景观格局的这些组分方面的变化明显出现在自西向东样带的 -20 km 和 10 km 之间,自南向北样带的 -25 km 和 10 km 之间,定量地指示了上海地区东西和南北发展轴线上城市化的前沿和城市景观梯度分异的特征,同时也表明景观破碎化程度随着城市化程度而急剧增加。

图 3 景观水平上的组分指数沿样带的变化,自西向东样带为实线,自南向北样带为虚线
Fig.3 Changes in landscape-level compositional metrics along the transects, W-E transect is solid line and S-N transect is dash line

2.3 景观格局沿样带的配置变化

与景观格局沿样带的组分变化相比,上海地区景观格局沿自西向东和自南向北两条样带的配置变化显示了与其相似的格局。反映斑块周长与面积比率的景观形状指数显示了随城市化程度增加而迅速上升(图 4a),该格局表明作为斑块镶嵌体的景观形

状随城市化程度增加而变得更不规则。其它反映景观形状复杂性的指数如平均斑块分维数和面积加权平均斑块分维数则表现出不规则行为(图 4b、c),主要由于移动窗口(6 km × 6 km)中斑块数目不足以计算这两项指数(分维数)以及缺少统计学意义方面的信息。与景观格局组分和配置方面都有关的测定斑

块聚集程度的聚集度指数则随城市化程度增加而下降(图 4d),其行为显示了与平均斑块大小相似的格局(图 3g)。总体来说,景观层次上的这些指数显示上海地区景观形状复杂性(景观形状指数)和景观破碎化程度(与聚集度指数成反比))沿城市化梯度而

明显增加。反映个体斑块平均形状复杂性的指数如平均斑块形状指数在城市边缘地区较低,随城市化程度增加而有增加的趋势(图 4e),而面积加权平均斑块形状指数则表现更为明确(图 4f),显示了与景观形状指数相似的格局(图 4a)。

图 4 景观水平上的配置指数沿样带的变化,自西向东样带为实线,自南向北样带为虚线

Fig. 4 Changes in landscape-level configurational metrics along the transects, W-E transect is solid line and S-N transect is dash line

3 讨论

3.1 上海地区城市化的总体格局

研究结果表明,可利用基于 GIS 的梯度分析和景观指数相结合的方法来定量测定城市景观的空间格局以及格局变化规律。上海市城市化的总体空间格局是随着城市化程度增加,景观在组分上更多样化,形状上更为复杂以及生态学上更破碎化。该研究结果回答了该文开始提出的两个问题。尽管这些问题的答案总体上是肯定的,但很多细节还需进一步讨论。不同的土地利用类型显示了明确的、但不一定是唯一的“空间特征”,其空间特征取决于特定的景观指数。例如城市用地沿自西向东和自南向北两样带显示了在城市中心达到峰值的单调梯度,而农业用地则显示了不同的、多峰值的梯度特征。所以不同的土地利用类型沿景观格局梯度确实表现出明显的“空间特征”。

同时,研究结果也表明人类活动对上海景观的影响取决于离城市中心的距离,沿两样带可以清楚地识别出城市化的中心和前沿,城市化区域高度的景观破碎化和空间复杂性可以作为距离的函数来定

量。因而,景观格局梯度分析可用来比较不同城市的发展格局或者同一城市不同时期的动态,这将有助于理解形成不同城市形态的各种内在过程。

3.2 定量城市化空间格局的重要性

有关景观格局形成机制的深入研究需要综合考虑地理、生态、社会、经济和政治等因素,而定量分析城市景观的空间格局对于理解城市景观的格局与过程,分析城市化的生态学和社会经济的后果,是必不可少的第一步。城市系统中物理的、生态的和社会经济的过程会创造、维持或破坏空间格局,同时空间格局也会促进、中和或阻碍这些过程。该项研究结果所显示的景观格局沿样带的梯度变化可能具有重要的生态学意义。例如,大量农业斑块的消失导致了生境的破碎化,而高密度的城市土地利用斑块会极大地影响区域的生物地球化学循环和生物多样性(Kent et al., 1999; 朱伟兴等, 2002)。城市化过程的预测以及它们的生态学与社会经济的影响是城市规划、资源管理和生物多样性保护等方面必须考虑的问题,而这些预测也需要空间格局的量化分析。

虽然该项研究不是设计用于检验已有的城市发展理论,但迅速发展中的上海城市景观格局研究可

以为城市发展形态提供一些有意义的视角。长期以来,地理学者、经济学者和社会学者广泛研究了城市的形态与进化,提出了城市形态的3种经典理论,即同心圆论、扇形模式论和多中心论(Luck & Wu, 2002)。上海市城市景观格局(1994年)的梯度分析显示了农业-工业-其它城市用地/居住用地-工业-农业的城市化梯度。该格局似乎比较符合同心圆论,部分由于该理论是根据具有一定基础的老城市(如芝加哥、旧金山和波士顿)的研究而提出的。然而,20世纪90年代以来,上海市的城市建设发展更为迅速,以各种自上而下约束的自组织和细胞自动机模型可能会更适合于理解未来上海市城市化的进程。

3.3 检验景观干预梯度假设

Forman 和 Godron(1986)提出了景观干预梯度(Landscape modification gradient,即自然的-管理的-耕作的-城郊-城市),斑块特征一般显示可预测的格局。具体可叙述为以下4个假设:斑块密度沿此梯度呈指数式增加(图5a);斑块形状规则性增加(图

5b);平均斑块大小和变差减小(图5c);以及景观连接度下降(图5d)。该研究结果可以用于检验这些假设,因为上海市景观格局的城市化梯度很好地代表了景观主要是从半自然的农业区,到城乡交错区,然后到高度城市化区域的过渡,而且其空间尺度也与这些假设大体一致。分析结果表明,随着城市化程度的增加:1)斑块密度的确呈指数式增长(图3a);2)在农业占优势的地区,斑块的形状复杂程度似乎较低,而在高度城市化区域有增高的趋势(图4b、f);3)斑块大小和它们的变差都同样降低(图3g、h);以及4)如果设定景观连接度与聚集度正相关或与斑块和边界密度负相关,则景观连接度急剧下降(图3a、b、d)。因此,该项研究的结果完全与假设1(斑块密度)相符,总体来说支持假设3(斑块大小)和假设4(连接度)。然而,斑块形状的结果似乎与Forman 和 Godron 假设的格局(假设2)不相符合。我们的解释是当城市化程度增高时,不仅斑块的密度而且斑块的形状复杂性也会增加。当然,该结论还需要更多的研究来进一步证实。

图5 景观干预梯度假设,根据 Forman 和 Godron(1986)重绘
Fig.5 Landscape modification gradient hypothesis, redrawn from Forman and Godron(1986)

参 考 文 献

- Forman, R. T. T. & M. Godron. 1986. Landscape ecology. New York: John Wiley and Sons.
- Fu, B. J. (傅伯杰) & L. D. Chen (陈利顶). 1996. Landscape diversity types and their ecological significance. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **51**: 454 ~ 462. (in Chinese with English abstract)
- Kent, M., R. A. Stevens & L. Zhang. 1999. Urban plant ecology patterns and processes: a case study of the flora of the city of Plymouth, Devon, UK. *Journal of Biogeography*, **26**: 1281 ~ 1298.
- Kowarik, I. 1990. Some responses of flora and vegetation to urbanization in central Europe. In: Sukopp, H., S. Hejny & I. Kowarik eds. *Urban ecology: plants and plant communities in urban environments*. The Hague, Netherlands: SPB Academic Publishing. 45 ~ 74.
- Luck, M. & J. Wu. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, **17**: 327 ~ 339.
- McDonnell, M. J. & S. T. A. Pickett. 1990. Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology*, **71**: 1232 ~ 1237.
- McGarigal, K. & B. J. Marks. 1995. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351. Pacific Northwest Research Station, USDA-Forest Service, Portland.
- Pickett, S. T. A., J. Burch, S. E. Dalton, T. W. Foresman, J. M. Grove & R. Rowntree. 1997. A conceptual framework for the study of human ecosystems in urban areas. *Urban Ecosystems*, **1**: 185 ~ 199.
- Pickett, S. T. A., M. L. Cadenasso, J. M. Grove, C. H. Nilon, R. V. Pouyat, W. C. Zipperer & R. Costanza. 2001. Urban ecological systems: linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **32**: 127 ~ 157.
- Sukopp, H. 1998. Urban ecology - scientific and practical aspects. In: Breuste, J., H. Feldmann & O. Uhlmann eds. *Urban ecology*. Berlin: Springer. 3 ~ 16.
- The Editorial Committee of the Report of Chinese Urban Development (中国城市发展报告编委会). 2002. The report of 2001 ~ 2002 Chinese urban development. Beijing: Xiyuan Publishing House. (in Chinese)
- Whittaker, R. H. 1975. *Communities and ecosystems*. New York: MacMillan.
- Whitford, V., V. A. R. Ennos & J. F. Handley. 2001. "City form and natural process" - indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, **57**: 91 ~ 103.
- Wu, J. G. (邬建国). 2000. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*. Beijing: China Higher Education Press. (in Chinese)
- Wu, J., D. E. Jelinski, M. Luck & P. T. Tueller. 2000. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics. *Geographic Information Sciences*, **6**: 6 ~ 19.
- Xiao, D. N. (肖笃宁). 1999. The development of the study of landscape ecology. Changsha: Hunan Science and Technology Press. 176 ~ 181. (in Chinese)
- Xiao, D. N. (肖笃宁), Y. Zhao (赵羿) & Z. W. Sun (孙中伟). 1990. Study on variation of landscape pattern in the west suburbs of Shenyang. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **1**: 75 ~ 84. (in Chinese with English abstract)
- Zeng, H. (曾辉) & N. N. Kong (孔宁宁). 2002. Landscape pattern analysis based on boundary characteristics. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**: 81 ~ 86. (in Chinese with English abstract)
- Zhu, W. X. (朱伟兴), J. G. Wu (邬建国) & L. Q. Zhang (张利权). 2002. Urban ecology: an ecological field facing new challenges. In: Wu, J. G. (邬建国), X. G. Han (韩兴国) & J. H. Huang (黄建辉) eds. *Lectures in modern ecology (II): from basic science to environmental issues*. Beijing: Chinese Science and Technology Press. (in Chinese)
- Zipperer, W. C., J. Wu, R. V. Pouyat & S. T. A. Pickett. 2000. The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes. *Ecological Applications*, **10**: 685 ~ 688.

责任编辑: 傅伯杰 责任编辑: 张丽赫