

# 北京生态用地的空间格局及复杂性

朱战强<sup>1</sup> 杨帆<sup>2</sup> 宋志军<sup>\*3</sup>

(1. 中山大学 地理科学与规划学院/综合地理信息研究中心, 中国广东 广州 510275 ;

2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 中国江苏 南京 210023, 3. 首都经济贸易大学 密云分校, 中国 北京 101500)

**摘要:** 在都市化背景下, 近年北京生态用地变化显著。运用多项景观指数对北京的有林地、灌木林地、其他林地、其他草地、旱地、水浇地进行了空间序列分析。结果显示: ①目前各类生态用地承担着多功能化的任务, 其复杂性较强; ②六类用地均存在空间自相关; ③有林地、其他林地、旱地存在显著的波谱特征, 并形成了空间圈层结构; 广义上, 其他林地、旱地、水浇地有空间分形与长程相关性倾向; ④各类生态用地具有五个渐进的演化阶段, 其演化次序与其景观变化存在着显著关联。本文的空间格局与复杂性分析有助于深入了解社会经济因素对北京生态用地空间演变的影响。

**关键词:** 生态用地; 空间格局; 空间序列分析; 复杂性; 北京

中图分类号: F301.24 文献标志码: A 文章编号: 1000 - 8462(2015)07 - 0168 - 08

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2015.07.025

## Exploring Spatial Patterns and Complexities of Ecological Lands in Beijing

ZHU Zhan - qiang<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>, SONG Zhi - jun<sup>3</sup>

(1. School of Geography and Planning/Center of Integrated Geographic Information Analysis, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3. Miyun Campus of Capital University of Economics and Business, Beijing 101500, China)

**Abstract:** Recently Beijing is experiencing significant changes in terms of ecological lands due to the urbanization. Using multiple landscape index, this paper conducts spatial sequence analysis for ecological lands in Beijing like forest land, shrub land, woodland, grassland, dry land, and irrigated land. Results show that: a) various current ecological lands have undertaken different function, which shows complexities characteristics; b) all six ecological lands are spatially auto-correlated; c) significant spectral characteristics have been found for forest land, woodland and dry land, as well as spatial sphere structure, and generally speaking, there is a correlation tendency between spatial fractal and long-range for woodland, dry land and irrigated land; d) five progressive stages of evolution exist for each ecological land, and whose evolution order is significantly correlating with landscape changing. The spatial pattern and complexites analysis in this paper may facilitate understanding impact of social-economic factors on evolutaion of ecological lands in Beijing.

**Key words:** ecological land; spatial pattern; spatial sequence analysis; complexity; Beijing

北京地处华北平原西北隅,西、北部为山区,东、南部为冲积平原,全域面积16 410.54km<sup>2</sup>[1]。作为大都市,近年北京建设用地的快速扩张使各类用地间的矛盾增强,生态用地不断受到侵占[2]。同时在快速城镇化驱动下,生态用地(一级地类为耕地、林地、草地)的内部结构不断发生改变,承担的多种发展功能也出现了异化[3]。而生态用地空间格局的

变化是都市化的直接反映,并会产生多种空间复杂性,但目前国内外的相关研究还相对有限[4]。

基于此,本文首先利用斑块紧凑率CoR、斑块密度PD、最大斑块指数LPI、最近邻指数NNI、连接性指数CONNECT、香农均匀度指数SHEI等景观指数对北京生态用地进行了传统空间分析。然后对其作圈层划分,对有林地、灌木林地、其他林地、其他

收稿时间: 2014 - 12 - 09, 修回时间: 2015 - 04 - 23

基金项目: 863计划项目子课题(2012AA121402), 国家自然科学基金项目(41401166), 广东省自然科学基金项目(S2012010009543); 广州市科技计划科学研究专项(2014J4100116)

作者简介: 朱战强(1979 )男,湖南郴州人,博士,讲师。主要研究方向为城乡生态规划、3s应用。E-mail: zhuzhanq@mail.sysu.edu.cn。

\*通讯作者: 宋志军(1970 )男,河南安阳人,博士,教授。主要研究方向为经济地理和土地资源管理。E-mail: songzzj@163.com。

草地、旱地、水浇地进行了空间序列(自相关、波谱、分形)分析。进而探讨了生态用地的空间结构、空间复杂性及其演化过程,其目的就是要掌握北京生态用地的现状、演变过程和演变机制。

### 1 数据处理及基础分析

#### 1.1 数据处理

本文采用2009年北京土地利用现状图,以ArcGIS10.0为平台提取了耕地、林地、草地三大类8个二级生态地类斑块(共计273 703个斑块,面积为10 591.88km<sup>2</sup>,占总面积的64.54%;表1、图1)的周长、面积等信息。并以天安门为中心、1km为半径步长进行圈层划分,共得到129个圈层,从而获得了各类生态用地不同圈层的景观指标。

#### 1.2 景观指标及基础性分析

生态用地斑块的形状往往可直接反映人类活动的影响程度及揭示其承担的社会经济功能。而紧凑率(CoR)可作为其典型的测度指标<sup>[5]</sup>,数学表达式为:

$$CoR = \sqrt{2\pi A/P} \quad (1)$$

式中:A为斑块面积(m<sup>2</sup>);P为斑块周长(m)。当斑块形状趋于复杂,同等面积下斑块的周长会增大,紧凑率值趋向于0;反之,则趋于1。分析显示,北京各圈层的各类生态用地的CoR标准差都在30%左右,其值偏大。但考虑到社会经济因素对北京各类生态用地形状的影响比较明显,加之其他景观指标的分析可作为辅助性解释,故本文认为可把CoR作为基础性指标进行分析。

表1 北京市生态用地的分类情况(2009)

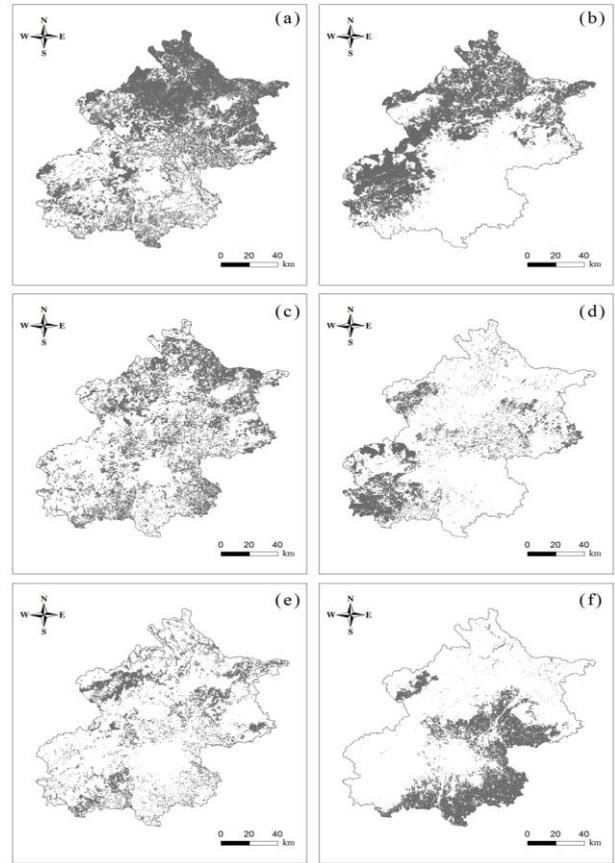
Tab.1 Extraction result of ecological land in Beijing(2009)

地类	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%	斑块数量/个	斑块百分比/%
林地	7 439.77	45.33	133 405	58.74
有林地	2 900.10	17.67	66 219	24.19
灌木林地	3 071.55	18.71	22 679	8.29
其他林地	1 468.13	8.95	44 507	16.26
草地*	842.48	5.13	26 643	9.69
其他草地	842.46	5.13	26 516	9.69
耕地*	2 309.63	13.94	113 655	41.4
水浇地	1 722.64	10.50	62 501	22.84
旱地	564.65	3.44	50 356	18.40

注 \*草地中的人工牧草地和耕地中的水田的斑块数量为127及798个,比例很小。本文在后面的分析中予以剔除。

本文参考传统景观分析及空间分析方法<sup>[6]</sup>,以斑块紧凑率为主要测度指标,选取斑块密度指数PD、最大斑块指数LPI、最近邻指数NNI、连接度指数CONNECT、香农均匀度指数SHEI等景观指数对

北京六类生态用地(人工牧草地和水田的比例很小,予以剔除。)进行了辅助性分析,并借助Fragstats3.0软件完成了各个指数的计算(表2)。



注 (a)有林地 (b)灌木林地 (c)其他林地 (d)其他草地 (e)旱地, (f)水浇地。图3~图6同。

图1 北京市六类生态用地的空间分布(2009)

Fig.1 Distribution of 6 ecological lands in Beijing(2009)

表2 六类生态用地的景观格局指数

Tab.2 Landscape pattern indices of 6 ecological land types

	有林地	灌木林地	其他林地	其他草地	旱地	水浇地
CoR	0.5622	0.5531	0.6048	0.5177	0.6389	0.6727
PD	22.8331	7.3836	30.3159	31.4742	89.1822	36.2832
LPI	0.6500	1.4218	0.5099	2.4387	0.3158	0.0700
NNI	0.6058	0.5604	0.5223	0.3972	0.3983	0.4645
CONNECT	0.1403	0.2940	0.1650	0.3250	0.1839	0.2829
SHEI	0.8278	0.8062	0.8465	0.6800	0.8944	0.9194

表2显示:①耕地大类下的旱地、水浇地作为人工景观,斑块的CoR值较高,表明其形状较为规整;而林地、草地大类下的四类生态用地的CoR值较低,斑块形状较为复杂。②PD值表明,旱地破碎化程度远高于其他地类,其次是水浇地;且这两类耕地与异质地类的交错分布明显,灌木林地的破碎化程度最低,斑块的平均面积最大。③LPI值表明,其他草地、灌木林地残存有较大的斑块,印证了这

两类生态用地较低的破碎度,而旱地、水浇地最大斑块面积的比例较低,人为干扰严重,这和前面的结论一致。④NNI值表明,六类生态用地的最邻近指数值均小于1,在空间格局上都显著地呈现为集聚分布;分析还显示旱地和其他草地的集聚性最强,而有林地及灌木林地的集聚性则较弱。⑤CONNECT值表明,其他草地、灌木林地、水浇地连通性较高(约0.3),而其余三类生态用地连通性较低,有林地的连通性最低。⑥SHEI值表明,水浇地、旱地均匀度较高,斑块面积差异不大,这也显示了耕地规划性强的特点;三类林地的均匀度低于两类耕地且彼此差别不大,其他草地的均匀度最低,斑块面积差异最大。

进一步对比北京各圈层生态用地斑块总体的CoR及PD值(图2),发现内圈层斑块紧凑率、破碎化程度都较高,外圈层则相反。这是因为:①内圈层受城镇化、各种规划影响大,斑块趋于规整,景观呈破碎化;而外圈层受地形影响,斑块形状较复杂且总体破碎;②由近郊到远郊,形状较为规整、破碎程度高的耕地斑块占总体生态用地的比例趋于减少,而形状复杂的林地的面积占比则逐渐增加,使得外圈层的紧凑率值下降、破碎化程度减低。以上说明北京生态用地由近郊向远郊存在着空间分异。

上述空间表现或许为北京建成区的都市化影响所致,也与已有研究的结论相符<sup>[1,7-9]</sup>。

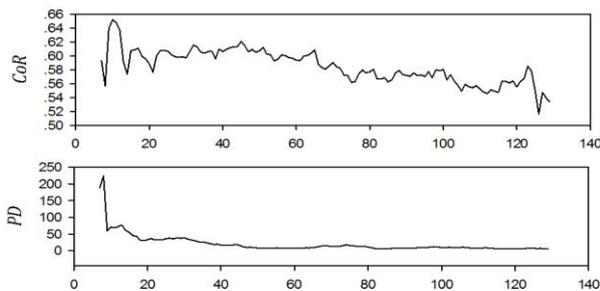


图2 各圈层生态用地的平均紧凑率及斑块密度指数  
Fig.2 The average CoR and PD of ecological land in different circles

## 2 空间序列分析

### 2.1 空间序列的自相关分析

对各圈层的CoR(i)值作标准差的标准化处理后,本文利用SPSS计算得到不同时滞(LAG)条件下的自相关系数(ACF)、偏自相关系数(PACF)和二倍的标准误差估计值(SE),并求得经过一阶差分的Q统计量(Box-Ljung)及其对应的卡方值(c<sup>2</sup>),以识别空间序列的自相关性、平稳性、周期性、趋势性等特征,同时通过一阶差分的Q统计量和卡方的对比得到空间滞后值(表3,以灌木林地为例)。进而由上述分析绘制出六类生态用地的自相关系数、偏自相关系数柱状图(图3、图4)。

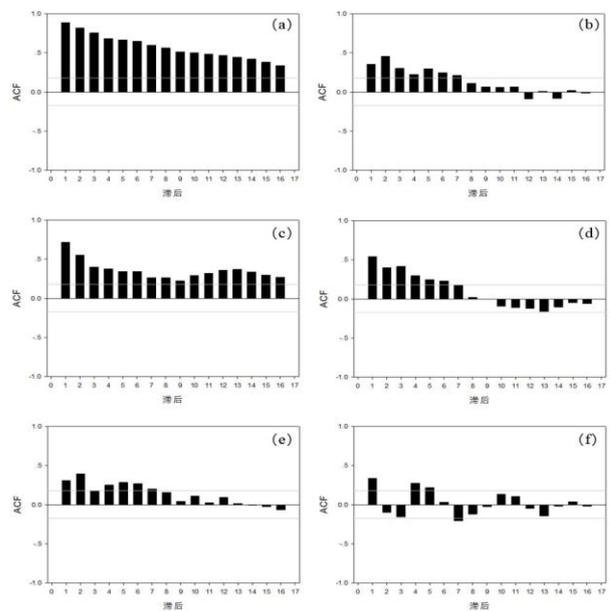


图3 六类生态用地空间序列的自相关系数柱状图  
Fig.3 The spatial autocorrelation coefficient histogram of 6 ecological land types

因波谱分析要求空间序列是平稳的<sup>[10]</sup>,本文进一步利用Eviews软件,使用ADF单位根检验方法进行了分析,结果显示六类生态用地的空间序列在 $\alpha = 0.05$ 的水平上都是平稳的(表4)。

表3 灌木林地的空间序列自相关分析结果(局部)

Tab.3 The spatial autocorrelation analysis of shrub land (part)

i	CoR	Z	LAG	ACF	PACF	SE	Box-Ljung*	c <sup>2</sup>
19	0.5446	-0.2440	1	0.3528	0.3528	0.1886	13.6961	3.8415
20	0.5395	-0.4867	2	0.4592	0.3823	0.1886	23.4252	5.9915
21	0.5504	0.0301	3	0.3015	0.0890	0.1886	10.1966	7.8147
22	0.5689	0.9152	4	0.2236	-0.0404	0.1886	5.6596	9.4877
23	0.5069	-2.0415	5	0.2978	0.1513	0.1886	10.1436	11.0705
24	0.5478	-0.0917	6	0.2465	0.1023	0.1886	7.0148	12.5916

注: \*因分析需要,此处的Box-Ljung统计量经过一阶差分。

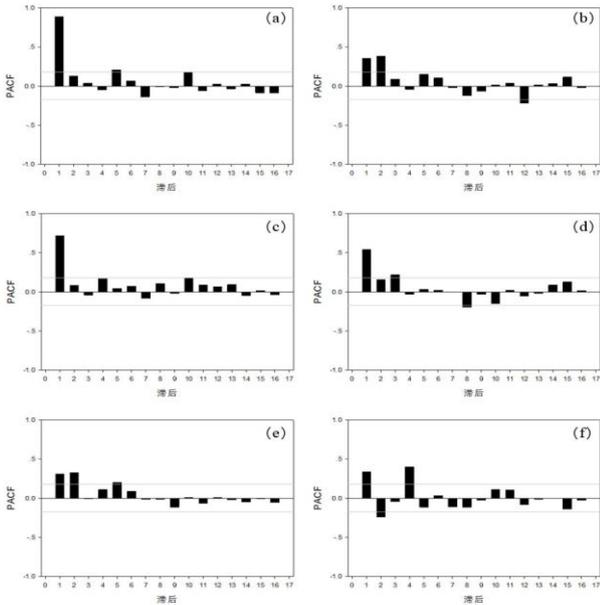


图4 六类生态用地空间序列的偏自相关系数柱状图  
Fig.4 The spatial partial autocorrelation coefficient histogram of 6 ecological land types

表4 六类生态用地的单位根检验结果

Tab.4 The unit root test result of 6 ecological land types

	有林地	灌木林地	其他林地	其他草地	旱地	水浇地
t-Statistic	-3.8131	-4.2222	-5.0017	-5.4163	-5.0176	-5.1125
5% level	-3.4471	-3.4532	-3.4471	-3.4554	-3.4501	-3.4528
p	0.0190	0.0059	0.0004	0.0001	0.0004	0.0003

注 基于趋势项及漂移项(Trend and Intercept)的检验均通过。

### 2.2 波谱分析

波谱分析即空间序列的谱分析,其作用包括:一是寻找空间序列中隐含的周期规律,揭示研究对象空间上的圈层格局;二是根据谱频率和对应谱密度间的关系,检验空间序列的分形特征及计算分形维数<sup>[11]</sup>。本文对空间序列  $CoR(i)$  作中心化处理,对空间序列  $X_i$  进行了快速傅立叶变换,进而得到了6种生态用地斑块的圈层结构波谱图(图5)。本文进一步在波谱图中分析了六类生态用地的变化周期,进行了Fisher检验( $\alpha=0.05$ )。

### 2.3 分形及长程相关性检验

对二维系统而言,若经波谱分析得到的频率  $f$  和谱密度  $p(f)$  有幂指数关系:

$$p(f) = af^{-\beta} \quad (2)$$

且波谱指数满足  $0 < \beta < 2$ , 则表明该序列和分形有深刻联系,并在现实空间(Real Space)上表现为分形等特征<sup>[12]</sup>,因此可通过检验是否表现为这一函数关系以判断其是否具备分形特征。因生态用地的分形现象多受大都市社会经济的快速演变而产生,故本文已降低拟合优度(至少达到  $R^2=0.85$ ),以分

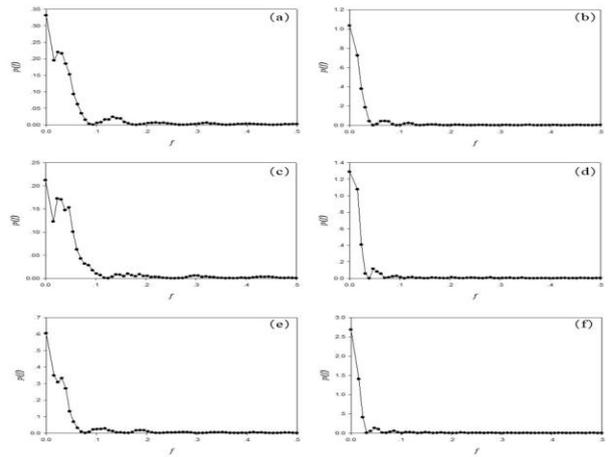


图5 六类生态用地的波谱图

Fig.5 The spectrogram of 6 ecological land types

析其基本发展态势。对于有分形特征的空间序列,可利用波谱指数 $\beta$ 计算表征生态用地在城市化影响下的空间复杂程度的自仿射记录维数  $D$ ,及检验空间序列的长程相关性的Hurst指数  $H$ 。对于一维的空间序列数据  $\beta$ 、 $D$ 、 $H$ 间有如下关系式<sup>[13]</sup>:

$$\beta = 5 - 2D \quad (3)$$

$$D = 2 - H \quad (4)$$

图6中标识了六类生态用地的频率-谱密度双对数的拟合优度  $R^2$  及相应的  $\beta$ 、 $D$ 、 $H$  值,分析结果显示六种用地的拟合优度  $R^2$  都不如意。结合Chen认为京郊建成区已具有了多重分形特征<sup>[14]</sup>,而京郊的农村居民点、多种耕地类型(据另一划分方法)实际也处于部分具有分形特征的状态<sup>[15-16]</sup>,据此本文认为上述分析乃是单分形的规律性不强、只有部分生态用地具有分形趋势等原因所致,这或为更复杂的多重分形所掩盖所致。由于后面的空间自相关、波谱分析为分形分析提供了数理基础,所以本文认为这应该是一种空间复杂性的表现,可称之为分形趋势( $R^2 > 0.6$ );但由于  $R^2$  不能满足既定标准,不能谓之分形特征。

## 3 结果分析

### 3.1 有林地的分析结果

有林地指树木郁闭度  $\geq 0.2$  的乔木林地<sup>[17]</sup>(《土地利用现状分类标准》,下同)。如表1所示,有林地占北京生态用地斑块总数的24.19%,占北京总面积的17.67%。有林地分布于距离中心6~129km的123个圈层,剔除近端的6~8km圈层(建成区内,斑块数25块)及远端的125~129km圈层,本文以8~125km的117个圈层为分析对象。结合有林地的空间分布

图(图1a),可发现其分布相对均匀。

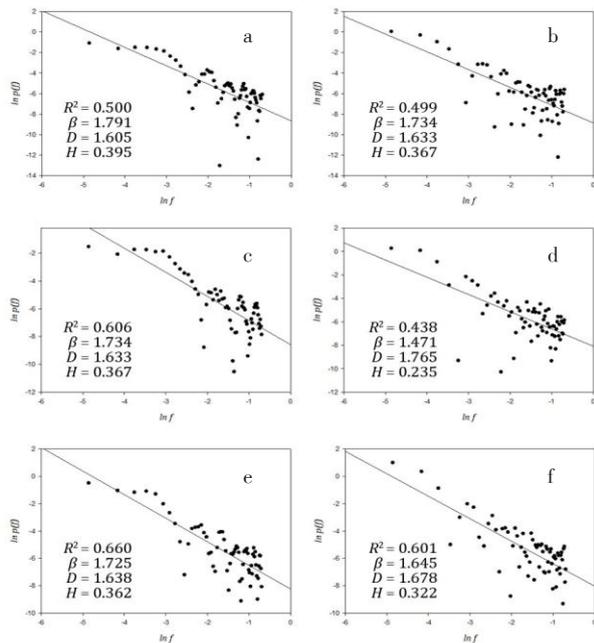


图6 六类生态用地的分形及长程相关性检验结果

Fig.6 The fractal and long range correlation test result of 6 ecological land types

3.1.1 空间序列的自相关分析及波谱分析。分析显示,有林地具备自相关性(图3a),具有空间序列平稳性(表4)。波谱分析显示有林地空间属单主频序列,即有一个42.67km的周期。据此,有林地由形成了8~51km、51~93km、93~125km三个圈层(四舍五入,下同)。结合多种景观指数对各圈层的分析,参照相关研究、地形及北京林业现状<sup>[18]</sup>,本文认为:①8~51km圈层的有林地基本对应平原区的郊野公园、城乡建设用地间的闲置绿地及沿道路、河流的防护林带,并具有人工规划的特征,斑块破碎度高、形状规整。它主要承担社会服务、美化休闲、环境调节等功能,是京郊绿地系统的重要组成部分;②51~93km圈层有林地的社会服务功能降低,生态功能增强,同时斑块破碎度大幅减少,形状随意性增强,本圈层是有林地由平原向山区的过渡区;③93~125km圈层是山区,属生态涵养发展区,具有低破碎度、形状复杂的特点。

3.1.2 分形及长程相关性检验。如图6a所示,分形及长程相关性拟合优度 $R^2=0.50$ ,不符合要求。可认为有林地虽存在波谱特征(图5a),但没有形成分形特征,故没有必要对其进行进一步的空间复杂性及长程相关性的分析。

### 3.2 灌木林地的分析结果

灌木林地指灌木覆盖度 $\geq 0.4$ 的林地<sup>[17]</sup>。灌木林

地斑块占生态用地总数的8.29%,占北京总面积的18.71%。灌木林地分布于距中心12~14km及17~129km的西、北部山区的114个圈层图1(b),且存在大范围连绵分布区。它是标准距(某类斑块的几何中心距离区域中心的平均距离)最大的生态用地类型,表明灌木林地受都市化影响的程度较小。本文剔除近端的12~19km圈层(斑块数10个)及远端的127~129km圈层(斑块数24个),从而选择19~127km的108个圈层作为分析对象。

自相关系数柱状图(图3b)显示,灌木林地的空间序列平稳(表4)。波谱分析结果显示,灌木林地的空间序列不存在周期性波动(图5b),即不具有空间圈层结构,故没有分形特征和长程相关性。灌木林地连绵分布于西部山区,远离城市中心,受人类活动的干预小,所以景观连通性良好,破碎程度低(表1)。对比其余五类生态用地,可认为灌木林地是原始态较好的生态地类。

### 3.3 其他林地的分析结果

其他林地包括疏林地(指 $0.1 \leq$ 树木郁闭度 $< 0.2$ 的林地)、未成林地、迹地、苗圃等林地<sup>[17]</sup>。与有林地及灌木林地相比,其他林地的树木覆盖度较低、受人为活动影响大。如表1所示,其他林地占生态用地斑块总数的16.26%,占北京总面积的8.95%。其他林地分布于距中心6~129km的123个圈层(图1c),其整体空间格局中类似于有林地。剔除近端的6~7km圈层(斑块数1个)及远端的127~129km圈层(斑块数4个),本文选择7~127km的120个圈层作为主要分析对象。统计发现,其他林地斑块在距中心22~49km的27个圈层出现集聚(占其他林地斑块总数的59.28%、总面积的37.73%)。该圈层正处于近郊平原区,其与城乡建成区犬牙交错、联系紧密。

3.3.1 空间序列的自相关分析及波谱分析。自相关系数柱状图(图3c)显示,其他林地呈明显的空间周期波动,时空序列具有平稳性(表4)。波谱分析表明,其他林地存在43.67km、21.33km两个空间周期,是典型的双主频序列(图5c)。据42.67km的周期,形成了7~50km、50~92km、92~127km三个圈层。其他林地、有林地的42.67km周期的一致与两者三个圈层大致相同,说明背后或有相同的作用机制。然而,通过对比卫星图像与实地调研发现近郊圈层(7~50km)的其他林地除对应郊野公园绿地、闲置绿地外,还存在经济功能较强的苗圃。至于21.33km周期实际上恰恰是42.67km周期的一半,据此形成

7~28、28~50、50~71、71~92、92~114、114~127km 六个圈层,这是对第一周期的进一步细分和加强。

3.3.2 分形及长程相关性检验。分形及长程相关性计算拟合优度  $R^2=0.606$ (图 6c),由此判断,最多只能认为其他林地具有空间分形的倾向(较旱地及水浇地为弱)。Hurst 指数显示其他林地具有长程负相关倾向。

林地占北京总面积的 45.33%,是生态用地的主体(表 1)。其中,有林地和其他林地出现了相同的空间分布周期(42.67km),不同的是,其他林地的 Fisher 检验值( $a=0.1541$ )比有林地( $a=0.1327$ )高,在 42.67km 周期基础上还可细分 21.33km 周期,这说明其他林地比有林地的空间发育程度更为成熟。此外,其他林地的分形倾向也比有林地高,这印证了其他林地与人类活动关系更密切、受城镇化影响更大的推断。

#### 3.4 其他草地的分析结果

其他草地指树木郁闭度 $<0.1$ ,表层为土质、以草本植物为主、不用于畜牧业的草地<sup>[17]</sup>。如表 1 所示,其他草地斑块数占生态用地斑块总数的 9.69%,占草地总面积的 99.99%以上(可代表北京草地),占北京总面积的 5.13%。其他草地分布于距中心 7~127km 的圈层,本文剔除了近端的 7~14km 圈层(斑块数 18 个)及远端的 119~127km 圈层(斑块数 18 个),主要针对距中心 14~119km 的 105 个圈层进行了分析。

空间自相关分析显示,其他草地的空间序列具有平稳性(图 3d、表 4)。波谱分析显示它不存在任何的周期,自然也不具备空间上的圈层式结构及分形特征。

其他草地有别于牧草地,不能成为畜牧业的生产载体,因而受人类活动干预相对较少。对比发现,其他草地和灌木林地都具有空间自相关性但不存在显著的波谱特征、分形特征,这似乎可用两者都不直接具备社会经济价值来解释。

#### 3.5 旱地的分析结果

旱地指无灌溉设施,主要靠天然降水种植旱生农作物的耕地,包括没有灌溉设施仅靠引洪淤灌的耕地<sup>[17]</sup>。表 1 显示,旱地占生态用地类型斑块总数的 18.40%,占总面积的 3.44%。旱地分布于距中心 8~127km 的 119 个圈层,本文剔除近端的 8~10km 圈层(斑块数 11 个)及远端的 126~127km 圈层(斑块数 8 个),选择了 10~126km 的 116 个圈层作为主要分析对象。

3.5.1 空间序列的自相关分析及波谱分析。空间自相关分析、单位根检验证实旱地的空间序列是平稳的(图 3e、表 4)。波谱分析表明,旱地的空间序列呈现单一 32km 的主频(图 5e)。据此旱地形成了 10~42、42~74、74~106、106~126km 四个圈层。结合相关研究、地形条件和北京市农业布局现状<sup>[18]</sup>,利用各类景观指数对各圈层进行分析,可认为:①10~42km 是非农功能主导的近郊平原圈层,地处城乡交融地区,受城镇化影响大,与城乡建设用地高度混杂,破碎度显著高于其他圈层,适宜蔬果花卉而非大田作物种植,功能倾向于生态保育、田园景观、观光休闲等。②42~74km 是农业功能主导的中郊平原圈层,斑块数量占旱地的近半(46.97%),破碎度比近郊有所下降,以种植大田作物为主,是京郊旱地农业生产的主产区。③74km 之后,地形上已进入山区。但 74~106km 圈层的破碎度、紧凑率及其标准差和中郊平原圈层没有显著差别,它延续了之前的农业主导功能(主要作物由大田作物转变为特色农产品),属山区农业主导圈层;106~126km 圈层旱地斑块数量及破碎度急剧减少,因山区属北京生态屏障。

3.5.2 分形及长程相关性检验。如图 6(e)所示,分形及长程相关性拟合优度  $R^2=0.660$ ,旱地的分形特征相比前述的四类生态用地都要显著。在认同北京部分生态用地有了分形倾向的前提下,自仿射记录维数( $D=1.638$ )表明,旱地的空间复杂性稍低于水浇地,略微高于其他林地。

#### 3.6 水浇地的分析结果

水浇地是指有水源保证和灌溉设施,在一般年景能正常灌溉,种植旱生农作物的耕地,包括种植蔬菜等的非工厂化的大棚用地<sup>[17]</sup>。表 1 显示,水浇地占生态用地斑块总数的 22.84%,占总面积的 10.50%。如图 1f 所示,水浇地主要位于距中心 6~127km 的 121 个圈层中,本文剔除了近端的 6~8km 圈层(斑块数 4 个)和远端的 106~127km 圈层(斑块数 18 个),选择了 8~106km 的 98 个圈层作为分析对象。空间上明显集聚在东南部的平原地区(斑块数占总数的 71.13%,占该类地类总面积的 74.62%),基本对应距中心 8~47km 圈层,除此之外,延庆盆地也有一定的分布,具有明显的低地平原指向性。分析发现,水浇地的标准距在六类生态用地中是最小的,从空间分布现状上看,水浇地是六类生态用地中受城镇化影响程度最大的地类。

3.6.1 空间序列的自相关分析及波谱分析。分析发

现,水浇地的空间序列是平稳的(表4)。分析图3f表明,自相关系数似乎存在着正弦波动,结合偏自相关系数柱状图(图4f)判断空间序列也许存在一个大小为3阶的周期。然而,波谱分析进一步显示,水浇地不存在明显的波谱特征,即其斑块形状不存在由内向外的周期性波动。

3.6.2 分形及长程相关性检验。如图6f所示,水浇地的分形及长程相关性拟合优度 $R^2=0.601$ ,可认为其已经具备分形倾向,且空间复杂性在出现分形倾向的其他林地、旱地、水浇地三者中是最高的。

经济功能最高的水浇地没有出现波谱特征却出现了分形倾向,并不意外。本文认为:水浇地在六类生态用地中受城镇化影响最强烈,进而其承担的功能逐步细化,且在空间上由纵向功能分异(如空间上的同心圆结构)转变为横向功能分异(同一圈层受多种发展功能影响的结构化分异)。多种功能的叠加最终导致水浇地整体上不再存在显著的周期,从而造成波谱特征的退化,但人为因素的影响却使其形状产生了分形倾向<sup>[19]</sup>。

### 3.7 小结

3.7.1 北京市生态用地的圈层结构。分析表明,有林地、其他林地、旱地存在空间上的波谱特征。其中,有林地出现42.67km的周期,形成了8~51、51~93、93~125km的三个圈层,分别代表平原圈层、过渡圈层、山区圈层。其他林地也出现了42.67km的周期,形成了与有林地相仿的7~50、50~92、92~127km的三个圈层;同时还出现了21.33km的周期,是对42.67km周期的进一步细分。旱地则出现了32km的周期,形成了10~42、42~74、74~106、106~126km的四个圈层,分别代表近郊平原圈层、远郊平原圈层、山区农业主导圈层、山区生态主导圈层。以上三类生态用地的波谱特征,表面上可以理解为不同用地类型斑块形状由近郊至远郊的周期性波动,实质上是京郊生态用地受多功能化、地形等多因素影响的综合体现。其圈层结构及承担的发展功能分异虽与杜能圈相近,但却赋予北京生态用地图谱化推移的内涵<sup>[20-21]</sup>。

3.7.2 北京市生态用地的演化阶段及其关联因素。总结六类生态用地的空间序列发现:①六类生态用地的空间序列均呈现明显的自相关性,自相关系数呈指数衰减或正弦衰减,偏自相关系数则基本是一阶或二阶截尾,可认为符合自回归AR(1)或AR(2)模型,其中还出现了部分生态用地类型的波谱特征及分形倾向;②六类用地中,水浇地出现了波谱特征的退化,除水浇地外的五类生态用地的空间序列自相关性、波谱特征、分形倾向均是循序渐进的,这可解释为后一个特征的出现建立在前一个特征已存在的基础之上。因此,本文认为生态用地处于一个动态的演化链上,根据其空间序列相关特征的存在与否,大致可划分出五个阶段(表5)。

分析表5可知,北京市已不存在自然状态的生态用地,灌木林地、其他草地目前处于复杂化前期,有林地处于复杂化初期,其他林地、旱地处于复杂化中期,水浇地处于复杂化后期。六类生态用地的空间复杂性由强到弱的演化次序为:水浇地>旱地、其他林地>有林地>灌木林地、其他草地。演化次序和生态用地的社会经济功能呈正向关联。

分析发现,斑块紧凑率越高、最大斑块优势度越低、斑块面积均匀度越高,则生态用地处于越成熟的演化阶段。然而,生态用地的破碎度、集聚度和演化程度并没有显著关联。表征连通度的连接度指数CONNECT虽然在秩相关分析中不显著相关( $p>0.05$ ),进一步分析发现:其他草地、灌木林地的经济功能和社会服务功能相对较弱,表现出连通性越高则演化次序越低的趋势,而其余四类生态用地则表现为连通性越高则演化次序越高的特点。其原因或许可以理解为,其他草地、灌木林地的自然生态特征明显,而其余四类生态用地则更多反映了社会经济功能的增强及多功能化的发展。

3.7.3 北京市生态用地的复杂性及长程相关性。在放宽置信度的情况下分析具有分形倾向的地类的自仿射记录维数(图6),水浇地( $D=1.678$ )稍高于其他两类(其他林地( $D=1.633$ )、旱地( $D=1.638$ )),这表明水浇地的空间复杂性相对较高(但还是低于农

表5 生态用地的演化阶段  
Tab.5 Evolution stages of ecological land

阶段	I	II	III	IV	V
	自然状态	复杂化前期	复杂化初期	复杂化中期	复杂化后期
空间序列自相关	不存在	存在	存在	存在	存在
波谱特征	不存在	不存在	存在	存在	不存在*
分形特征	不存在	不存在	不存在	存在	存在

注: \*多种功能的混杂使其不再具有显著主频,从而不呈现显著的波谱特征。

村居民点的)。总体来看,目前这种空间复杂性还处于形成的初期。

分析 Hurst 指数(图6),其他林地、旱地、水浇地都出现了一定的长程负相关性,水浇地略强于其他林地和旱地,这表明上述三类生态用地的空间形态变化具有规整(即  $CoR$  值增大)、复杂(即  $CoR$  值趋于减少)相间分布的趋势,这可能意味着对斑块形状产生影响的社会经济因素也呈非均匀的空间分布。结合实际情况分析,其主导影响因素可能集聚在各级城乡居民点,靠近居民点的生态用地斑块在规划等的干预下形状会趋于规整,反之则出现凌乱或面积差异较大等明显的景观差异。以上讨论或假设均有待于在未来的研究中深入探讨。

## 4 结论和讨论

### 4.1 生态用地的圈层结构与多功能化

有林地、其他林地、旱地存在空间上的波谱特征。其明显的空间圈层结构,是区域发展在北京近、中、远三个基本圈层的现实反映:近郊生态用地夹杂于各种建设用地间,斑块破碎;中郊生态用地趋于规整;远郊的山区生态用地因地形而显现较低的紧凑率,其斑块形态也有别于前两个区域。这一圈层结构更多是受空间发展的图谱化推移而形成的,即多种生态用地的圈层格局实际是北京社会经济发展的一种空间表现形式。另外,有林地、其他林地、旱地圈层界线的不同还表明北京整体的功能分异并非完全同步,北京的生产功能、景观功能、社会服务等功能在空间上都会有一定程度的提前或延后。这说明北京空间结构的调整或耦合目前尚未达到均衡状态。

### 4.2 生态用地的演化特征与演化进程

北京市已不存在自然状态的生态用地,灌木林地、其他草地目前处于复杂化前期,有林地处于复杂化初期,其他林地、旱地处于复杂化中期,水浇地处于复杂化后期。六类生态用地的空间复杂性由强到弱的演化次序为:水浇地 > 旱地、其他林地 > 有林地 > 灌木林地、其他草地。同时,各类生态用地的演化次序和其社会经济功能呈正向关联。

本文将生态用地的演化划分为5个阶段,并认为各类特征是循序渐进而出现的。然而,这一生态用地的渐进演化是由纵向功能分异转变为横向功能分异所致,即各类生态用地的圈层错位是其在城镇化、产业化、非农化进程中逐步分化的结果。

而通过以上的两点可看到,空间格局与复杂性

分析有助于认识社会经济因素对生态用地的影响,并促进生态用地空间格局的有效调控,进而丰富城市化背景下与生态空间研究理论与方法体系。

### 参考文献:

- [1] 李衡.北京市景观格局动态变化研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [2] 李锋,叶亚平,宋博文,等.城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例[J].生态学报,2011,31(19):5623-5631.
- [3] 李姝娟,李洪远,孟伟庆.滨海新区生态用地特征与低碳目标下的优化策略[J].中国发展,2011(4):82-87.
- [4] 陈彦光.中国城市化水平的自回归与功率谱分析[J].地理研究,2007(5):1021-1032.
- [5] Chen Yanguang. Derivation of the functional relations between fractal dimension of and shape indices of urban form[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35: 442-451.
- [6] 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000:96-107.
- [7] 刘灿然,陈灵芝.北京地区植被景观斑块形状的分形分析[J].植物生态学报,2000(2):129-134.
- [8] 梁书民,金陶陶.中国大城市建成区扩张与城郊耕地保护研究[J].环境保护,2005(11):59-63.
- [9] Zhao Pengjun. Managing urban growth in a transforming China: Evidence from Beijing[J]. Land Use Policy, 2011, 28: 96-109.
- [10] 李万绪.周期图方法在径流序列分析中的应用[J].陕西水力发电,1990(4):25-30.
- [11] 陈彦光.地理数学方法:基础和应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [12] 陈彦光.分形城市系统:标度、对称和空间复杂性[M].北京:科学出版社,2008.
- [13] Chen Yanguang. Exploring the Fractal Parameters of Urban Growth and Form with Wave-Spectrum Analysis[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2010, doi:10.1155/2010/974917.
- [14] Chen Yanguang, Wang Jiejing. Multifractal characterization of urban form and growth: the case of Beijing [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2013, 40(4): 884-904.
- [15] 宋志军,关小克,朱战强.北京农村居民点的空间分形特征及复杂性[J].地理科学,2013,33(1):52-60.
- [16] 宋志军,刘黎明.基于波谱与分形特征的北京市耕地空间结构研究[J].地理研究,2012,31(8):1071-1079.
- [17] GB/T 21010-2007.土地利用现状分类[S].
- [18] 张凤荣,赵华甫,等.都市型现代农业产业布局[M].北京:石油大学出版社,2007.
- [19] 宋志军,刘黎明.北京市城郊农业区多功能演变的空间特征[J].地理科学,2011(4):427-433.
- [20] 张有坤,樊杰.基于生态系统稳定目标下的城市空间增长上限研究——以北京市为例[J].经济地理,2012,32(6):53-58.
- [21] 陈晓红,万鲁河,周嘉.城市化与生态环境协调发展的调控机制研究[J].经济地理,2011,31(3):489-492.