

文章编号: 1007-4619(2005)06-0697-11

# 北京地区温度场分布与地面空间结构关系的分形描述

杜华强<sup>1</sup>, 赵宪文<sup>2</sup>, 范文义<sup>3</sup>

(1. 浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 北京林业大学 资源与环境学院, 北京 100083;  
3. 东北林业大学 森林资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 提出构建北京市温度分布与空间结构的之间定量关系的思想。首先以 2002-05-22 ETM+ 作为数据来源, 利用分形理论初步构建北京市温度分布与盒维数, 最大、最小非均匀标度指数  $\alpha_{max}$ ,  $\alpha_{min}$ , ( $\alpha_{max} - \alpha_{min}$ ) 以及信息维  $D(1)$  之间的关系; 然后利用北京市 1997-05-16 和杭州 1998-08-11 的 TM 遥感数据对所建立的关系进行了验证。研究表明, 温度分布与盒维数、 $\alpha_{min}$  和  $D(1)$  之间存在较好的正相关关系, 而与 ( $\alpha_{max} - \alpha_{min}$ ) 之间的关系在不同时间和城市存在较大的差异。温度分布与盒维数、 $\alpha_{min}$  以及  $D(1)$  之间的定量关系, 为定量解释城市空间结构与温度分布之间奠定了一个新基础。城市空间结构极为复杂, 利用分形理论研究城市环境要素、现象与城市空间特征之间的关系时, 对于分形参数的物理、现实意义一定要根据具体的研究时间、地点和目的给出谨慎的解释。

**关键词:** 北京; 温度分布; 盒维数; 多重分形; 空间结构

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A

## 1 引 言

热岛是由城市本身造成的<sup>[1]</sup>。除了风速、气压等天气外在条件的影响, 这个“本身”应该指城市地表结构、地面建筑物空间结构或排列以及人为因素等。城市发展过程中, 地表结构的变化不可避免的改变太阳辐射收支分布、导致城市和郊区表面辐射和大气温度的差异<sup>[2]</sup>, 城市、郊区温度的差异就是通常所说的城市热岛效应, 它长期以来一直受到人们的关注。

地表结构的变化一方面造成土地覆盖类型的变化如泥土地面变成水泥地面、植被减少等, 已有研究<sup>[3]</sup>表明城市温度分布与土地覆盖类型具有很好的对应性, 也就是说不同的土地覆盖类型对应着不同的温度范围; 另一方面是地面建筑物或构筑物结构、排列的空间差异性。土地覆盖类型变化和空间结构的差异共同造成了城市空间结构的复杂性, Robert C 等<sup>[4]</sup>指出城市热岛表面和空气温度的变化

揭示了复杂景观对表面能量收支的影响, 热岛信息能够帮助决策者在制定政策时考虑整个城市热量和水的需求在空间上的差异。因此, 可以肯定的是下垫面类型或空间结构是影响城市热场分布的主要原因之一。

分形是探索空间结构、描述复杂问题及不规则现象的一个优秀的工具。在过去的 20 年里, 利用分形思想来研究城市景观空间复杂性或其变化的例子不少<sup>[5-8]</sup>, 然而多数研究往往热衷于分形维数的计算。就像研究景观的人们热衷于各种景观指数的计算一样, Harbin Li<sup>[9]</sup>指出, 如果景观指数与生态学过程无关, 尽管这种指数能在一定程度上反映景观的特征, 那么它也是没有意义的。同样, 如果分形维数与环境要素无关或没有现实意义, 那么它的应用也将受到限制。也有一些研究借助分形理论定性分析了城市热岛或热岛的空间变化<sup>[2, 10]</sup>, 但定量关系的分析却少见。那么热岛或温度场分布与城市本身空间结构之间存在定量关系吗?

所有的这些问题值得我们考虑。如果能够建立

收稿日期: 2004-04-08; 修订日期: 2005-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 30371192)资助。

作者简介: 杜华强(1975—), 男, 博士, 2005年毕业于北京林业大学森林经理专业, 获博士学位, 现工作单位为浙江林学院林业与生物技术学院, 主要从事遥感在资源环境监测中的应用研究, 发表论文 5 篇。E-mail: ddh1975@126.com。

城市温度分布与城市空间结构的分形参数之间的定量关系,就可以利用这种关系描述或模拟城市热场分布情况,从而为城市的规划建设服务。本着这个目的,本文提出构建温度场分布与空间结构之间定量关系的思想,试图用分形技术探讨不同温度分布区下垫面空间分布、结构与温度分布之间的关系,研究空间分布、结构差异对温度分布的影响。

## 2 研究数据及处理

本研究使用的卫星遥感数据包括:北京市 2002-05-22 ETM+数据,北京市 1997-05-16 TM 数据以及杭州 1998-08-11TM 数据。

Landsat7 ETM+第 8 波段为全色波段,其空间分辨率高(15m),具有丰富的空间结构信息,然而其光谱信息却较差。为了便于空间结构的分析,充分利用第 8 波段的空问信息和 4, 3, 2 波段组合光谱信息的优点,我们将 4, 3, 2 波段组合与第 8 波段利用 HS 变换及其逆变换做融合处理,然后以融合数据为基础,分析其空间结构特征。

对于相同区域的遥感数据,其空间分辨率的大小对分形维数有影响<sup>[7]</sup>。因此,对北京 1997-05-16 Landsat5 TM 以 2002 年融合数据作为参考对其做几何校正,重采样到与其一致的空间分辨率。然后以 4, 3, 2 波段组合作为研究数据。

杭州市的 TM 数据质量较好,在简单处理的基础上,同样以 4, 3, 2 波段组合作为研究数据。因为杭州与北京属于完全不同的两个地方,所以空间分辨率的大小可以不予考虑。

## 3 研究方法

(1)首先从 2002 年北京 ETM+遥感数据第 6 波段反演获取温度场分布状况,并根据温度由高到低的变化规律,在融合图像中截取相应的子图像;然后用分形技术来描述这些子区域空间的复杂性、结构、分布等特征;最后初步建立温度分布与表征子区域空间分布、结构信息的分形维数或多重分形参数之间的关系。

(2)验证。

①未知温度分布。从北京市 1997 年 TM 数据 4, 3, 2 波段组中截取与 2002 年相同位置的子区,同样用分形的方法分析其空间特征;然后从第 6 波段反演地面亮温,统计子区的亮温;最后建立温度分布

与分形维数或多重分形参数之间的关系。

②已知温度分布。以杭州市遥感数据为基础,按(1)所述步骤建立温度分布与分形维数或多重分形参数之间的关系。

### 3.1 地面亮温反演

从遥感图像获取下垫面的亮温或温度场分布是行之有效的办法。与 NOAA 卫星相比, TM 空间分辨率高,图像近似正射,大气程差较均匀,数据可比性强,对于热场的研究更为有效<sup>[11]</sup>。从第 6 波段反演地面亮温包括以下两个步骤。

第一步:图像的 DN 值转换为传感器辐射亮度值:

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \times (DN - Q_{\min}) + L_{\min} \quad (1)$$

第二步:辐射亮度值转换为地面亮温:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (2)$$

其中:L为辐射亮度值( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ),  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$ 为传感器参数( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ),  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$ 代表最大、最小 DN 值, T 为地面亮温(K),  $K_1$  为标定常数( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ),  $K_2$  为标定常数(K)。对 ETM+和 TM5 而言,公式(1)和公式(2)中各参数的取值有所不同,如表 1。

表 1 公式(1), (2)中参数的取值

Table 1 The value of all parameters for formula (1), (2)

	$L_{\min}$	$L_{\max}$	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	$K_1$	$K_2$
LandSat ETM+	0	17.04	1	255	666.09	1282.71
LandSat TM 5	1.238	15.60	0	255	607.76	1260.56

注:公式及相应参数参考 Landsat7 用户手册

### 3.2 遥感图像分形分析

分形几何假设空间数据集具有尺度不变的属性,并可以用一个幂函数来表示,函数的指数就是分形维数<sup>[12]</sup>,它是自然表面结构及其空间复杂性的定量描述。单一分形维数是平均属性信息的一个描述,而实际自然表面是由一套而不是由一个单一的分形维数所描述<sup>[13]</sup>,即具有多重分形的特点。多重分形分析可以从整体到局部精细的分析遥感数据的空间结构、空间分布以及研究数据空间构形不规则程度等。

### 3.2.1 盒维数计算方法

计算遥感图像分形维数的方法很多,如三角棱柱法、分线法、方差图法、盒维数法、傅立叶频谱法等。盒维数法是计算分形维数最容易的方法之一,而且它与维数的知觉概念联系的更紧密<sup>[13]</sup>,参考相关文献[12-17],将盒维数计算方法介绍如下。

设图像大小为  $N \times N$ , 将其分割成  $S \times S$  的子块 ( $N/2 \geq S > 1$ ,  $S$  为整数), 令  $\sigma = S/N$ 。将图像想像成三维空间中的曲面,  $x, y$  表示平面位置,  $z$  轴表示灰度值, 这样  $x, y$  平面被分割成许多  $S \times S$  的网格, 在每个网格上, 是一列  $S \times S \times S$  的盒子。设某子块内图像灰度的最小值和最大值分别为  $m_{\min}$  和  $m_{\max}$ , 则覆盖该子块所需的盒子数为:  $\text{BOXNUM}(i) = (m_{\max} - m_{\min}) / S + 1$ ,  $N(\sigma)$  为在某尺度  $\sigma$  下覆盖整个图像所需要的盒子数目, 由此得到图像的盒维数计算公式:

$$D_b = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\log(N(\sigma))}{\log\left(\frac{1}{\sigma}\right)} \quad (3)$$

实际计算时, 分别以尺度和该尺度下覆盖整个图像所需盒子数形成两个序列即:  $[1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_n]$  和  $[N(\sigma_1), N(\sigma_2), \dots, N(\sigma_n)]$ , 然后对其做对数回归, 回归直线斜率就是分形维数。

### 3.2.2 多重分形参数计算方法

按前述图像分块和盒维数计算方法。设某尺度  $\sigma$  下, 覆盖第  $i$  块的盒子数为  $N_i$ , 覆盖整个图像所需要的盒子总数为  $N$ , 定义一个质量概率 (mass probability)  $p_i = N_i/N$  来定量描述数据分布的局部特征。设在尺度  $\sigma$  下, 将图像分割为  $n_p$  个子块数, 用下面的分割函数 ( $p_i$  的  $q$  阶矩) 来表述盒子的权重数, 即:

$$N(q, \sigma) = \sum_i p_i^q \approx \sigma^{-\tau(q)} \quad (4)$$

其中  $\tau(q)$  为质量指数,  $q \in \mathbb{R}$ ;  $i=1, 2, \dots, n_p$ 。由 (4) 式可以很方便的推出  $\tau(q)$ :

$$\tau(q) = - \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\log N(q, \sigma)}{\log(\sigma)} \quad (5)$$

对  $\tau(q)$  做如下变换, 可以得到遥感数据广义分形维数的表达式:

$$D(q) = \frac{\tau(q)}{1-q} = \frac{1}{q-1} \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i p_i^q}{\log(\sigma)}$$

$$= \frac{1}{q-1} \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i N(q, \sigma)}{\log(\sigma)} \quad (6)$$

即  $\tau(q) = (q-1)D(q)$ 。为了保证  $D(q)$  的连续性,

当  $q=1$  时令  $D_1 = - \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sum_i p_i \log(p_i)}{\log \sigma}$  即信息维。

因此, 数据分布的  $q$  阶矩可以由不同的维数  $D(q)$  来描述, 也就是说不同点周围的密度由不同的分形维数描述, 这是多重分形的一个尤为重要的地方<sup>[18]</sup>。

上述质量指数  $\tau(q)$  是  $q$  阶矩的一个变化比率, 它和  $D(q)$  一起从整体上表征了多重分形, 它们不能反映局部空间结构、分布的特征<sup>[17]</sup>, 为了描述多重分形体的细节变化, 需要计算另外一套参数即: 非均匀标度指数  $\alpha(q)$  (Lipshitz Hölder 指数) 及其维数分布函数  $f(\alpha)$ 。直接给出  $\alpha(q)$  的计算公式:

$$\alpha(q) = \frac{d}{dq} [\tau(q)] = - \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sum_i p_i^q \log p_i}{\sum_i p_i^q \log \sigma} \quad (7)$$

即  $\alpha(q)$  是  $\tau(q)$  的一阶微分。如果令  $\mu_i = \frac{p_i^q}{\sum_i p_i^q}$ , 则

(7) 式可改写成:

$$\alpha(q) = - \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \log p_i}{\log \sigma} \quad (8)$$

$f(\alpha)$  的计算公式如下:

$$f(\alpha) = - \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \log \mu_i}{\log \sigma} \quad (9)$$

以  $f(\alpha)$  为纵坐标、 $\alpha(q)$  为横坐标的绘图曲线称为多重分形谱 (Multi-fractal Spectrum)。横坐标的变化范围即:  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  被定义为多重分形谱范围 (Spectrum Range SR), SR 越大, 研究区域纹理、空间分布越不规则<sup>[13]</sup>。物理量在空间内具有不规则分布的许多实际问题中, 借助多重分形参数的计算, 可以实现其不均匀分布的定量表征<sup>[19]</sup>。

## 4 温度分布与分形参数之间关系的构建

### 4.1 温度分布

直到目前 TM 热红外还主要集中在亮温和 DN 值的直接应用水平上<sup>[20]</sup>, 但有研究表明地温与气温密切相关, 并通过航天遥感综合调查获得了北京市气温和亮温的回归方程如:  $(y = 1.157632184x - 2.521548146)$  ( $x$  为亮温,  $y$  为气温)<sup>[1]</sup>。另有研究表明辐射温度可能高于地表温度, 并且发现用 Landsat 5 始终会高估表面温度  $1^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}$ <sup>[2, 21]</sup>。

利用公式 (1)、公式 (2), 从第 6 波段计算得到亮

温,并根据相关气象资料和文献对亮温做简单处理,获得了北京市 2002-05-22温度分布图,如图 1(a)。

如果以东西长安街为南北界限,那么从图 1(a)可以看出, (1)四环以内,南部高温区明显多于北部; (2)南部温度分布不均匀,东南和西南方向有较多的高温分布区,并且在东西城区交界处、天安门广场以南出现一个高温区,北部温度分布较为均匀; (3)郊区和山区温度相对较低; (4)水体如颐和园、紫竹院等温度最低; (5)西南等较为开阔的郊区也出现了高温分布状况。

根据图 1(a)温度分布图,将温度由高到低依次分为高温区、次高温区、中温区、较低温区、低温区和最低温区等 6 个等级。对应 6 个温度等级,我们分

别从融合图像中相应位置选择如图 1(a)所示 A, B, C, D, E, F 6 个不同的区域作为研究对象。各个子区域大小均为 128×128(行、列)。其中, A, B, C 3 个子区域为市区,主要包括商业建筑、居民楼以及纵横交错的交通网络,地表以水泥结构为主,植被分布很少; D 区为山区,分布有密集的植被; E 区为以农田、小道为主的郊区; F 区以水体为主。

图 1(b)是杭州市 1998-08-11 温度分布图,可以看出,高温区主要分布在市区。基本上,从市区到城市周边、再到郊区,农田温度逐渐降低,而西湖和钱塘江等水体温度最低。按温度由高到低,分别截取如图 1(b)所示 A, B, C 和 D 4 个区域作为研究对象,其中 A 为市区, B 城市边缘, C 郊区, D 为西湖。

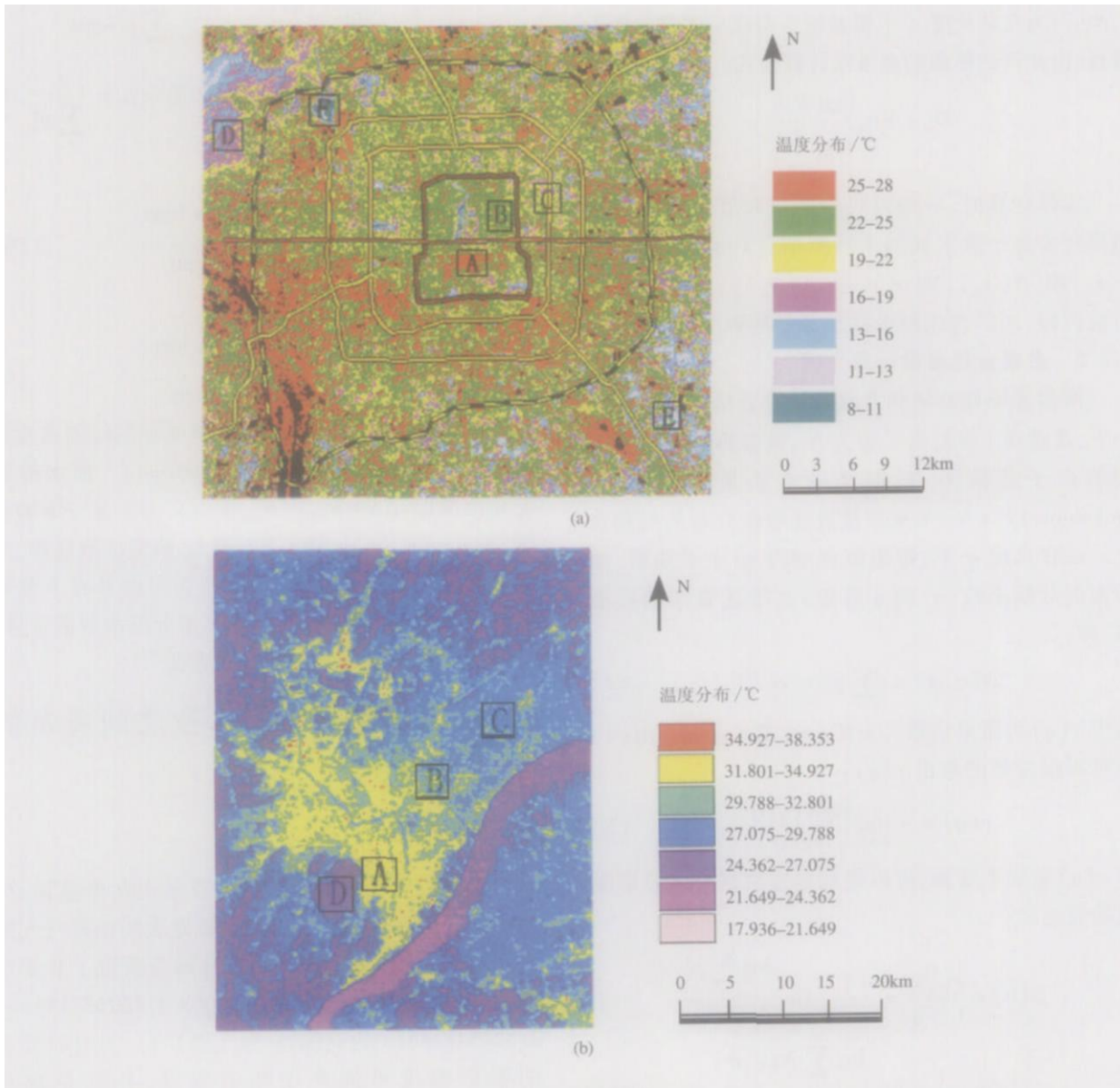


图 1 温度分布图, (a)北京市 2002-05-22, (b)杭州市 1998-08-11

鉴于图像空间分辨率和同一温度等级成片区域的大小,4个子区域的大小取  $64 \times 64$ 。

## 4.2 盒维数及多重分形参数计算

对于所有子区,根据公式(3)~(9)计算它们的盒维数与多重分形参数如表 2。其中  $D(1)$ 为信息维;  $f(\alpha(-1))$ 是  $f(\alpha)$ 随  $\alpha(q)$ 变化  $q=-1$ 时的取值;  $\log(MT)$ 表示 6 个区域平均温度的自然对数。

表 2 子区平均温度自然对数、盒维数和一些主要的多重分形参数

Table 2 Log mean temperature box dimensions and main Multi-fractal parameters of all sub-regions

		A	B	C	D	E	F
北京 2002	盒维数	2.4362	2.5305	2.5366	2.4629	2.4277	2.4253
	$D(1)$	1.9624	1.9696	1.9622	1.9231	1.9265	1.8116
	$f(\alpha(-1))$	1.9541	1.9536	1.9323	1.8399	1.8433	1.8077
	$\alpha(0)$	2.0387	2.0335	2.0413	2.1018	2.0911	2.3016
	$\alpha_{max}$	2.6499	2.7654	2.8361	2.8029	2.8857	2.8036
	$\alpha_{min}$	1.5622	1.7282	1.6193	1.5678	1.5522	1.1519
	$\alpha_{max} - \alpha_{min}$	1.0877	1.0372	1.2168	1.2351	1.3335	1.6517
	$\log(MT)$	2.4363	2.5308	2.5366	2.4692	2.4277	2.4253
北京 1997	盒维数	2.2878	2.3512	2.3478	2.2053	2.2038	2.1866
	$D(1)$	1.95546	1.96647	1.95303	1.9497	1.91811	1.88599
	$f(\alpha(-1))$	1.95651	1.96221	1.94583	1.9559	1.91719	1.90278
	$\alpha(0)$	1.51805	1.59181	1.54456	1.5114	1.44169	1.42417
	$\alpha_{max}$	2.0441	2.03437	2.04919	2.0486	2.08787	2.12206
	$\alpha_{min}$	2.56448	2.53323	2.60946	2.4007	2.5665	2.55803
	$\alpha_{max} - \alpha_{min}$	1.04644	0.941416	1.0649	0.88938	1.12481	1.13386
	$\log(MT)$	3.6015	3.5421	3.4673	3.28273	3.2688	3.2323
杭州 1998	盒维数	2.5335	2.4271	2.3577	2.1641		
	$D(1)$	1.94923	1.94662	1.94619	1.8048		
	$f(\alpha(-1))$	1.9321	1.93056	1.93255	1.9172		
	$\alpha(0)$	1.66677	1.54331	1.5155	1.3629		
	$\alpha_{max}$	2.05564	2.05718	2.0565	2.2019		
	$\alpha_{min}$	2.80929	2.80867	2.71983	2.4947		
	$\alpha_{max} - \alpha_{min}$	1.14252	1.26536	1.20433	1.1317		
	$\log(MT)$	3.4908	3.4089	3.3724	3.2650		

以下讨论北京市 2002 年温度分布与分形参数之间的关系

### (1) 温度分布与盒维数之间的关系

从表 2 可以看出,北京市 2002 年市区的盒维数明显大于郊区、山区以及水体,这一结果与 Lam<sup>[5]</sup>、赵军等<sup>[6]</sup>、Z Islam<sup>[7]</sup>的结果一致。那么分形维数或者说空间复杂程度与温度分布有没有关系呢?

## 4.3 温度分布与分形参数之间的关系

为了构建温度分布与分形参数之间的关系,我们以各子区平均温度的自然对数(因为多重分形参数的计算都是在双自然对数坐标中求得,故一个自然的想法就是取温度的自然对数)为因变量,相应的分形参数为自变量,来研究空间特征与温度场分布之间的关系。表 2 列出了各子区域平均温度的自然对数。

由表 2 可以看出,温度与盒维数大小之间并不存在明显一一对应关系,主要在于,从 A 到 C 分形维数增大但温度降低,而从 E 到 F 却恰好相反。但通过对遥感图像的目视判读和实地考察,存在如下合理的解释:(1)A 区相对于 B、C 区域,具有更开阔的空间,而且植被覆盖很少,光谱局部变化小,所以 A 区空间结构简单,温度高于 B、C 区域;(2)市区下

垫面空间结构相对复杂,热容量和热岛率比郊区高,地面蒸腾和潜热的消耗却比郊区低;(3)郊区 D 多为山区植被, E 主要是农田道路,而 F 主要为水体,盒维数大小正好反映了它们的空间结构和复杂程

度,事实也是如此;水体的温度最低是很明显的。

但是,如果用 MC 表示市区 ABC 的平均值,就平均而言,从市区到山区、郊区,再到水体,其温度分布与分形维数具有很好的线性关系,如图 2(a)。

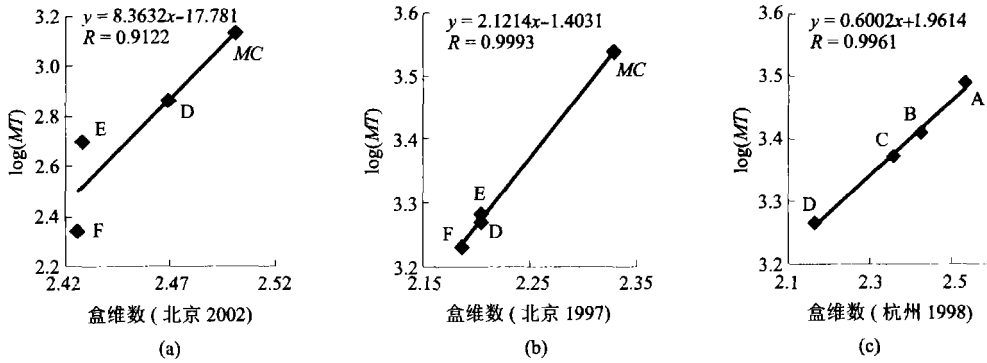


图 2 温度分布与盒维数之间的关系 (a)北京 2002、(b)北京 1997、(c)杭州 1998

Fig 2 The relationship between  $\log(MT)$  and box dimensions 2002 Beijing in (a), 1997 Beijing in (b) and 1998 Hangzhou in (c)

(2)温度分布与多重分形参数之间的关系

图 3(a), (b)分别是北京 2002年 6个子区域的广义分形维数曲线和多重分形谱。多重分形分析的一个重要方面是根据多重分形谱的形状、多重分形谱的变化范围  $\Delta\alpha$  或  $f(\alpha(-1))$  与  $D(1)$  的差异等来获取研究对象的空间分布及其不规则性等特征<sup>[12]</sup>。从图 3(b)可以看出 6 个子区域多重分形谱的形状、对称性均存在差异;而从表 2 可以看出,市区  $\Delta\alpha$  比郊区小,这也正好反映在图 3(b)中。根据以上结构分析可知,多重分形谱范围即  $\Delta\alpha$  大小反映了 6 个子区域研究区域空间分布的规则性差异。

另外根据多重分形参数的几何、物理意义<sup>[14, 17, 19]</sup>,  $\alpha_{min}$ ,  $\alpha_{max}$  是非均匀标度指数 (Lipshitz-Hölder exponent) 的最小值和最大值,它们是分形集尺度属性的一个测度<sup>[13]</sup>,  $\alpha_{min}$  代表概率最大、分形概率测度最为集中的子集属性,而  $\alpha_{max}$  代表概率最小、分形概率测度最为分散的子集特征; $D(1)$  是广义分形维数中的信息维,能够反映研究区域空间信息的大小。下面我们 6 个子区域的  $\alpha_{max}$ ,  $\alpha_{min}$ , ( $\alpha_{max} - \alpha_{min}$ ) 以及  $D(1)$  为自变量,建立它们与  $\log(MT)$  之间的关系。所有计算数据参见表 2。

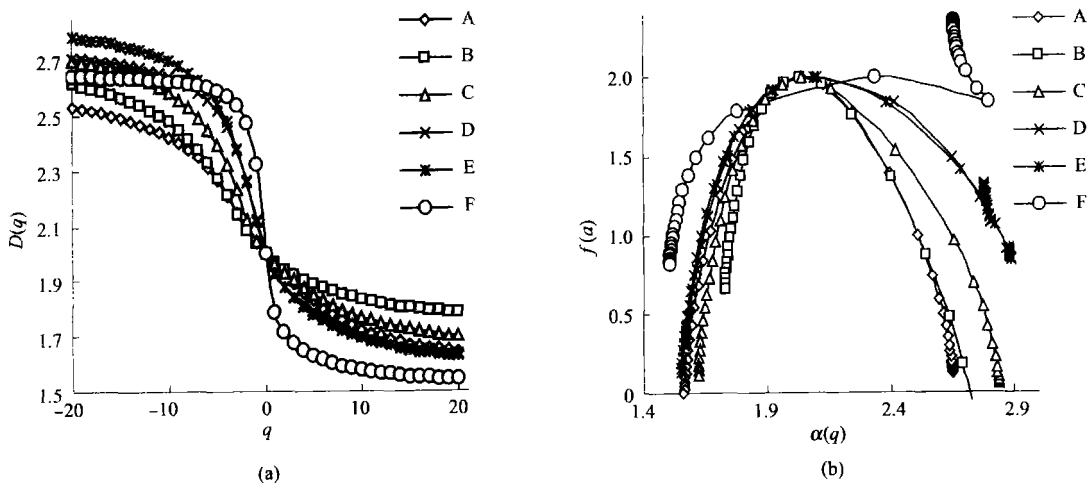


图 3 北京 2002年 A—F 6 个子区多重分形参数曲线:(a)广义分形维数;(b)多重分形谱

Fig 3 Curves of multi-fractal parameters of the six sub-regions of Beijing (2002):

图 4(a)~(d)是北京市 2002 年温度平均值自然对数与多重分形参数之间的关系曲线。可以看出,温度与  $\alpha_{\max}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$  以及  $D(1)$  之间较好的线性关系。

### (3) 验证

以上我们构建了北京市 2002 年温度分布与盒维数以及多重分形参数之间的关系。可以看出,无论是单一分形维数(市区平均)还是多重分形参数,温度分布与它们之间都存在较好的线性关系。然而,我们自然要提出的问题却很多,如:这种关系可靠吗?空间特征的差异真的反映城市温度分布的差异吗?对别的城市是否同样有效?……为了回答这些问题,我们以北京市 1997 年和杭州市 1998 年的数据对以上关系进行验证,验证过程、方法请参见研究方法一节。

图 2(b), (e) 分别是北京 1997 年和杭州 1998 年温度分布与盒维数的关系曲线;图 4(e)~(h)和 (i)~(l) 分别是它们与多重分形参数之间的关系图。通过对比分析可以发现,盒维数、 $\alpha_{\min}$  以及  $D(1)$  与温度分布之间始终保持着良好的线性关系;而  $\alpha_{\max}$  和  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$  与温度分布之间的关系却存在较大的差异,例如对于  $\alpha_{\max}$  而言,杭州 1998 年  $\alpha_{\max}$  与温度之间的关系和北京市 2002 年  $\alpha_{\max}$  与温度之间的关系恰好相反,而北京市 1997 年温度分布与  $\alpha_{\max}$  却没有明显的关系。

因此,对温度分布与分形参数之间的关系或者说空间结构对温度的影响一定要进行谨慎的解释,特别是各种分形参数的物理意义。

## 5 结果分析

### 5.1 温度分布与分形维数之间的关系分析

对城市而言,分形维数从市区到郊区,到水体的大小变化关系在国内外相关的研究中已经得到证实<sup>[5-7]</sup>;而自从 1818 年 Lake Howard 首次提出“城市热岛”的概念以来<sup>[10]</sup>,市区温度高于郊区已经得公认。那么,城市不同区域(特别是城市和郊区)空间复杂性差异是造成其温度分布差异的原因之一就成为本研究的一个推论。本研究从温度到结构,从结构到温度,再从温度回到结构(温度 $\rightarrow$ 结构 $\leftrightarrow$ 温度),所建立的温度分布与分形维数之间的关系也证明了这一点,并且它们之间的相关性都在 90% 以上。

事实上,遥感影像是地物空间光谱特征的综合

反映,包括地形和非地形信息即空间结构信息,局部尺度上的光谱变化会对分形维数  $D$  产生影响;当地物光谱信息变化缓慢时,分形维数值向小的方向变化,反之向大的方向变化<sup>[5,6]</sup>。分形维数是分形物体不规则和断裂程度<sup>[22]</sup>的量度,能够定量反映某一空间构形(spatial form)的复杂程度,分维数大,空间复杂性也越大。Z Islam 等<sup>[7]</sup>在研究城市土地利用时指出,分形维数越高,空间复杂程度、异质性也随之增大。

城市地物类型多样:高楼大厦密集分布、道路交通纵横交错、人流车辆川流不息、每一寸地面几乎都是砖石混凝土结构,植被、裸地很少,因此,城市局部空间地物光谱特征变化剧烈,分形维数较大,空间复杂,异质性大;同样市区的特征使其具有较高的热容量,地面蒸腾和潜热消耗小,所吸收的太阳辐射主要用来增加空气的温度,因而其温度相对较高。而越到郊区地物类型越单一,所以其分形维数和温度变化相对市区而言具有相反的趋势。

### 5.2 温度分布与多重分形参数之间的关系分析

图 4(b), (d), (f) 表明,随着  $\alpha_{\min}$  的增大,由城市到郊区、水体,不同区域的温度也相应增大,表现出很好的线性关系,其相关性达到 75% 以上,杭州更是达到了 99% 以上。显然,  $\alpha_{\min}$  的这种变化趋势正好反映城市、郊区等地面空间特征变化。根据李华等<sup>[23]</sup>对具有不同能量出射二次电子多重分形分析,  $\alpha_{\min}$  代表二次电子最稠密区域的奇异指数,随着电子能量的增大  $\alpha_{\min}$  逐渐减小,说明量子集向概率大的方向扩展。如果我们把城市到郊区不同区域不同地物类型的聚集状态想像成具有不同能量的“电子”,就不难理解温度分布与  $\alpha_{\min}$  之间正相关的关系。

如果  $\alpha_{\min}$  与温度分布正相关关系正确,  $\alpha_{\max}$  与温度分布的负相关关系应该成立如图 4(a)。然而图 4(e)和 (i) 却告诉我们事实并不是这样,其原因在于随着  $q$  趋近负无穷大,概率分布的权重对数  $\log N(q, \sigma)$  与尺度对数  $\log(\sigma)$  之间的线性关系越来越差,致使  $\alpha_{\max}$  往往会发生一定程度的畸变,而出现随着  $q$  减小,  $\alpha_{\max}$  也减小的情况,因此  $q$  的变化范围对多重分形谱变化范围的影响也值得考虑<sup>[12,19]</sup>。对于  $\alpha_{\max}$  与温度分布之间关系的不确定性笔者将会更深入的研究。另外,图 4(j)  $\alpha_{\max}$ 、(k)  $\alpha_{\min}$  都与温度分布成正相关,使我们不得不怀疑其中一个是错误的,然而根据上面的分析和已有的研究,笔者更愿意认

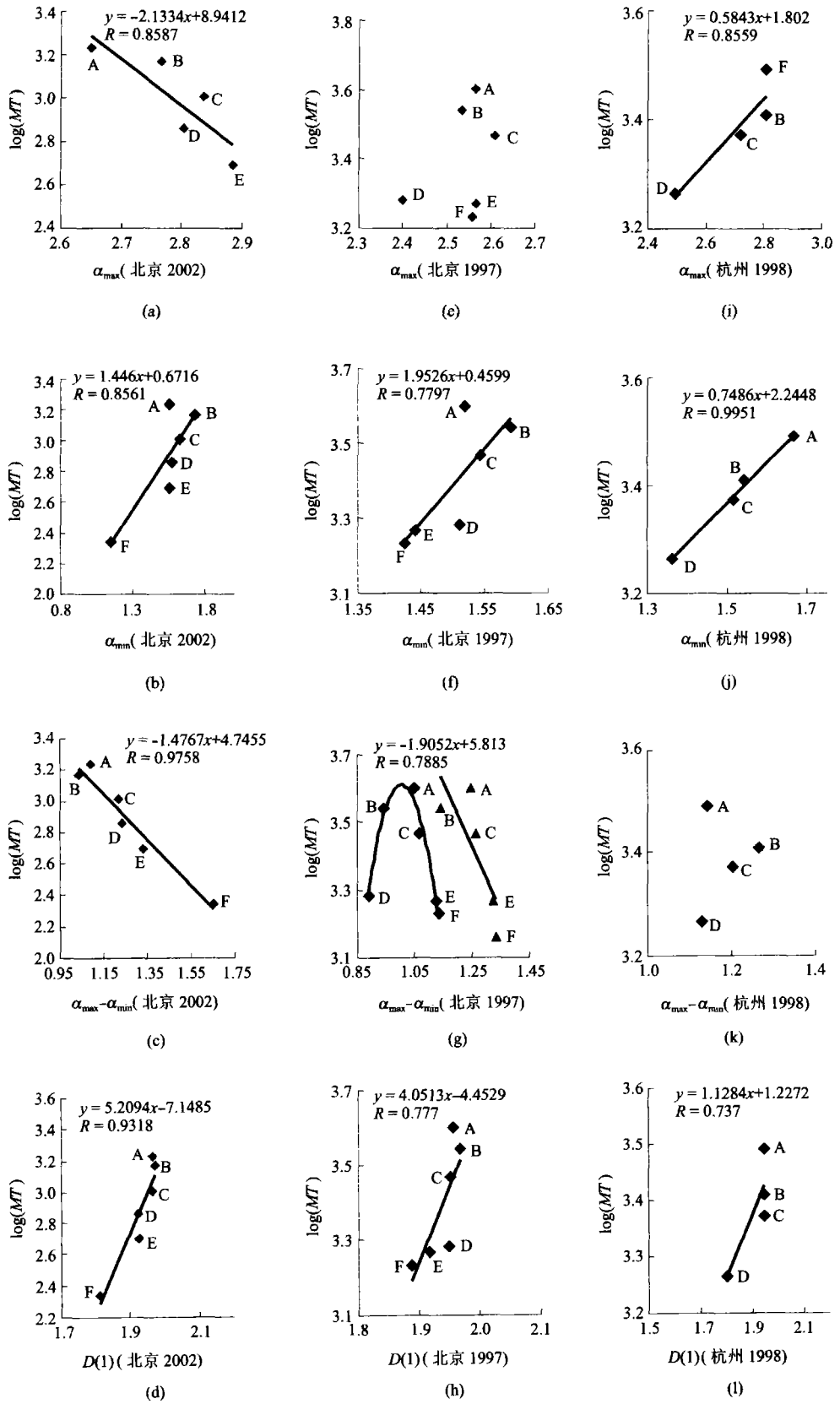


图 4  $\log(MT)$ 与  $\alpha_{min}$ ,  $\alpha_{max}$ ,  $\alpha_{max} - \alpha_{min}$ 及信息维  $D(1)$ 的关系曲线

为图 4(i)的这种关系是不确定的、错误的或者仅对所研究的区域有效。

$(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 是多重分形(谱)反映空间构形分布一个重要参数。对于遥感图像来说,其值越大,说明空间纹理分布越不规则<sup>[13]</sup>。以上  $\alpha_{\max}$ 的变化在很大程度上影响了  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 与温度分布的关系。从图 4(a)~(c)可以看出,  $\alpha$ 的变化与温度之间存在很好的对应关系。对于图 4(g)如果不考虑 D 区域,那么  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 与温度之间的关系与图 4(c)基本一致(如图 4(g)右边直线,其值统一向右相对平移了 0.2 个单位)。然而图 4(k)却没有这种关系。

事实上,有时规整的农田其空间构形或纹理比城市纵横交错的交通、道路规则,而农田的温度分布显然比市区低;而有时规划完善的市区又比凌乱分布的郊区、农田规则。因此即使  $\alpha_{\max}$ 不发生畸变,  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 与温度分布的关系也会让人产生怀疑。另外对于水体而言,其空间分布的、不规则性应该最小,但由于在两个城市中沒有足够大的“纯”水体区域,而使得水体包括了岸边等区域。复杂的水陆边界以及水陆光谱变化的强烈反差使得其空间不规整性增大,这也正是多重分形分析精细探测局部空间表面细节特征的优势。所以,如果有“纯”水体区域存在,图 4(c)的情况会发生变化,这恰好反映在图 4(j)中,因为所截取的杭州西湖子图几乎为整个湖区,这一点也说明了  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 与温度分布的不确定性。因此,对于温度分布与  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 的关系应该视具体时间、地点和研究目标做合理的分析。

根据公式(6)我们知道,当  $q=1$ 是,  $D(1)$ 是研究区域的信息维,而  $-\sum_i p_i \log(p_i)$ 也正是计算信息量常用的公式。通过以上的分析,我们知道市区空间复杂且异质较大,在遥感图像上其光谱变化剧烈,因此其信息量比郊区大是必然的。然而这里的信息维和信息量还有本质的差别,一方面分形或多重分形是一种多尺度分析,另一方面这里的  $p_i$ 还包括空间结构变化信息。所以图 4(d), (h)和 (l)说明随着不同区域空间信息量的增加,温度具有随之升高的趋势。另外,根据盒维数以及  $\alpha_{\min}$ 与温度分布之间的关系分析,也能从另一个侧面反映信息维  $D(1)$ 与温度分布之间的这种正确关系。

## 6 结论与讨论

本研究利用分形思想,分析了两市三期遥感数

据不同区域空间特征,并且构建了城市温度场分布与分形维数和一些多重分形参数之间的定量关系。研究表明市区(就平均而言)、城市周边、郊区农田、山地、水体等的温度分布与盒维数、最小奇异指数  $\alpha_{\min}$ 以及信息维  $D(1)$ 之间存在明显线性关系,特别是与盒维数的相关系数达到 90%以上,而且物理意义明显;而与  $\alpha_{\max}$ 和多重分形谱的变化范围  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 之间的关系并不一致,往往随着研究区域的时间(如北京市 2002 年与 1997 年)和地点(北京与杭州)而发生变化,对其应该根据具有研究区域空间纹理、构形的分布状况做合理的解释。

分形是解释复杂现象、描述空间结构、构形特征的一个优秀的工具,然而对于分形参数如分形维数、多重分形参数的物理意义应该谨慎解释,特别是解释它们与具有现实意义的现象如城市温度分布(本文)、大气污染物浓度<sup>[14]</sup>、土壤空隙空间排列<sup>[12]</sup>之间的关系时更应该小心谨慎,这也是分形应用的难点和价值所在。

影响城市温度空间分布差异的因素还很多,如:风速、风向、建筑物的高度以及人为排热等等,如果在分析中综合考虑或排除这些因素的影响,其结果应该会更满意。另外分析图 1(a), (b)我们也发现存在“同温异区(构)”现象,这就像遥感中经常会面临的“同物异谱或异物同谱”现象一样,给我们的分析带来麻烦。对于这中情况,笔者认为分区研究的实际意义比较大。所有的这些问题,我们将会继续深入研究。

城市空间极为复杂,温度分布与空间结构之间关系也同样如此。本文利用分形的思想来构建、解释温度分布与空间结构之间关系只是一个尝试与探索,如果能对更多关注城市发展、研究城市热岛的人们一些启发,本研究的目的就达到了。

总之,研究城市温度分布,可以帮助我们了解城市地表的空間结构,反过来,研究城市地表结构,能够在一定程度上揭示温度分布差异的内在规律,提高我们对不同土地覆盖类型热行为和景观模式在热环境过程中作用的认识,为城市管理、规划决策奠定基础。

**致 谢** 本研究部分数据、资料由美国加州大学伯克利分校杨军博士、中国科学院遥感应用研究所郭衫老师和北京林业大学王新杰老师提供,在此表示感谢。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Zhao J H. Remote Sensing Approach to Urban Thermal Island [J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 1994, **7**(4): 40-43 [赵俊华. 城市热岛的遥感研究 [J]. 城市环境与城市生态, 1994, **7**(4): 40-43.]
- [2] Qi H W. Fractal Analysis of Satellite-Detected Urban Heat Island Effect [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, **69**(5): 555-566.
- [3] Li J H. Study of Relation between Land-Cover Conditions and Temperature Based on Landsat/TM Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, **13**(1): 18-28.
- [4] Robert C Balling Jr, Sandra W Brazel. High Resolution Surface Temperature Patterns in a Complex Urban Terrain [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, **54**(9): 1289-1293.
- [5] Lam N S N. Description and Measurement of Landsat TM Images Using Fractals [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, **56**(2): 187-195.
- [6] Zhao J, Li X H, Shan Y B. The Fractal Research of Typical Features Remote Sensing Image in Beijing Areas [J]. *Northeast Surveying and Mapping*, 2001, **24**(2): 3-7. [赵军, 李先华, 单勇兵. 北京地区典型地物遥感图像分形研究 [J]. 东北测绘, 2001, **24**(2): 3-7.]
- [7] Islam Z, Mettemicht G. Fractal Dimension of Multiscale and Multisource Remote Sensing Data for Characterising Spatial Complexity of Urban Landscapes [A]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]*, 2003.
- [8] Yang S, Shen N Z. A Fractal Study of Wuxi Urban Pattern Based on Remote Sensing [J]. *Remote Sensing for Land & Resource*, 2002, (3): 41-43 [杨山, 沈凝泽. 基于遥感技术的无锡市城镇形态分形研究 [J]. 国土资源遥感, 2002, (3): 41-43.]
- [9] Li H B, Wu J G. Use and Misuse of Landscape Indices Landscape Ecology [J]. *Landscapes Ecology*, 2004, **19**: 389-399.
- [10] Chen Y H, Shi P J, Li X B, et al. Research on Urban Spatial Thermal Environment Use Remote Image [J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2002, **31**(4): 322-326. [陈云浩, 史培军, 李晓兵等. 城市空间热环境的遥感研究 [J]. 测绘学报, 2002, **31**(4): 322-326.]
- [11] Chen Y H. Analysis and Application of Spatial Heat Environment in Shanghai City Using Remote Sensing Image [D]. *Beijing: China University of Mining & Technology*, 1999. [陈云浩. 上海城市空间热环境的遥感图像分析与应用研究 [D]. 中国矿业大学, 博士学位论文, 1999.]
- [12] Adolfo N D Posadas, Daniel Gimenez, Roberto Quiroz, et al. Multifractal Characterization of Soil Pore Systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(5): 1361-1369.
- [13] Parrinello T, Vaughan R A. Multifractal Analysis and Feature Extraction in Satellite Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(9): 1799-1825.
- [14] Lee C K. Multifractal Characteristics in Air Pollutant Concentration Time Series [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **135**: 389-409.
- [15] Indin D I, Gelashvili D B, Rozenberg G S. Multifractal Analysis of the Species Structure of Biotic Communities [J]. *Doklady Biological Sciences*, 2003, **389**: 143-146.
- [16] Li H Q, Lin Z K, Lin F. Aerial Classification Method Based on Fractal Theory [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**(5): 353-357. [李厚强, 刘政凯, 林峰. 基于分形理论的航空图像分类方法 [J]. 遥感学报, 2001, **5**(5): 353-357.]
- [17] Chen Y G, Zhou Y X. A Study of Multifractal Measure of the Spatial Structure of the Urban System in Central Plains [J]. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis*, 2001, **37**(6): 810-818. [陈彦光, 周一星. 豫北地区城镇体系空间结构的多分形分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, **37**(6): 810-818.]
- [18] Martinez V J, Paredes S, Borgani S. Multiscaling Properties of Large-scale Structure in the Universe [J]. *Science*, 1995, **269**: 1245-1247.
- [19] Sun X, Wu Z Q, Huang Y. The Theory and Application of Fractal [M]. *The Press of University of Science and Technology of China*, 2003. [孙霞, 吴自勤, 黄韵. 分形原理及其应用 [M]. 中国科学技术大学出版社, 2003.]
- [20] Qin Z, Kamieli A, Berliner P. A Monowindow Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(18): 3719-3746.
- [21] Goetz S J, Hall B L, Markham, Dubayah R O. Intercomparison of Retrieved Surface Temperature from Multiresolution Sensor at the FIFE Site [A]. *Technical Papers of ASPRS/ACSM [C]*, 1993.
- [22] Benoît Mandelbrot, Wen Z Y, Su H. Fractal Object Form, Chance and Dimension [M]. *The Press of World Book*, 1999. [Benoît Mandelbrot 著, 文志英, 苏虹译. 分形对象: 形、机遇和维数 [M]. 世界图书出版社, 1999.]
- [23] Li H, Ding Z J, Wu Z Q. Multifractal Characteristics of Surface Distribution of Secondary Electrons [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 1994, (3): 213-227. [李华, 丁泽军, 吴自勤. 出射二次电子表面分布的多重分形谱 [J]. 电子显微学报, 1994, (3): 213-227.]

## Fractal Characterization for Relationship between Temperature Distribution and Ground Spatial Structure in Beijing Areas

DU Hua-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Xian-wen<sup>2</sup>, FAN Wen-yi<sup>3</sup>

(1. College of Forestry and Biotechnology of Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China;

2. College of Resources and Environment of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. College of Forestry Resources and Environment of Northeast Forestry University, Haerbin 150040, China)

**Abstract** The idea of constructing the relationship of temperature distribution to spatial structure of Beijing areas was brought forward in the research. Firstly, Landsat7 ETM+ remote sensing data of Beijing city (22, May, 2002) was used to build the relationships between temperature distribution and Fractal Parameters such as Box dimensions, Lipshitz Hölder exponents  $\alpha_{max}$ ,  $\alpha_{min}$ ,  $(\alpha_{max} - \alpha_{min})$  and information dimension  $D(1)$ . Then, Landsat5 TM remote sensing data of Beijing city (16, May, 1997) and Hangzhou city (11, Aug, 1998) were used to verify the previous relationships. Finally, this research showed that the distribution of city temperature fields existed the evidenced linear relationship with Box dimensions  $\alpha_{min}$  and  $D(1)$ , and their correlative coefficients are higher, however, with  $\alpha_{max}$  and  $(\alpha_{max} - \alpha_{min})$  was uncertain. City spatial characteristic is very complex, when explains the relationships of environmental factor and (or) phenomena to spatial structure of city by fractal theory, the physical and real significance of fractal parameters must be explained carefully.

**Key words** Beijing temperature distribution; box dimension; multi-fractal; spatial structure