

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.016

# 减弱热岛强度的城市形态布局 关键参数与响应机制

黄焕春<sup>1</sup>, 运迎霞<sup>2</sup>, 赵 瑞<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 风景园林学院, 南京 210037; 2. 天津大学 建筑学院, 天津 300072)

**摘要:**基于天津市1992—2013年7景夏季TM遥感影像,分别提取城市形态与反演城市热岛强度,利用ArcGIS与MATLAB等大数据分析计算软件,定量研究城市形态布局与热岛强度的响应机制与参数曲线,提出了热岛强度双指标测度的概念算法,即最高热岛升温 and 热岛升温总量。结果表明:热岛强度随着城市形态面积的增大而上升,总体上城市形态总面积与最高热岛升温、热岛升温总量都呈线性关系;城市形态离散度和临近度,与最高热岛升温不存在明显相关性,而与热岛升温总量呈线性关系;斑块面积与热岛强度呈正相关,50 km<sup>2</sup>以上的斑块,面积与最高热岛升温呈线性关系,与热岛升温总量呈二次曲线关系;周长面积比与热岛强度呈负相关,与最高热岛升温成S曲线关系,当介于[0.005, 0.04]时则与最高热岛升温呈四次曲线关系;斑块分维数与热岛强度呈正相关关系,与最高热岛升温呈线性关系,与热岛升温总量呈三次曲线关系。

**关键词:**布局参数;城市形态;热岛强度;热岛升温总量;最高热岛升温

中图分类号:TU111.19 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)05-0095-08

## Key Parameters in Urban Form Layout for Weakening Urban Heat Island Intensity and Its Response Mechanism

Huang Huanchun, Yun Yingxia, Zhao Rui

(1. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China;

2. School of Architecture, Department of Urban Planning, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

**Abstract:** The relationship between urban form layout and Urban Heat Island (UHI) intensity response mechanism was quantified and the parameter curves was studied. Large-scale analysis and calculation software such as ArcGIS and MATLAB are used and extract Urban Form and inversed UHI, based on the seven times summer TM images of Tianjin between 1992 and 2013. The results show that: Firstly, the double indicators measure for the UHI intensity was proposed, that is, highest UHI temperature value and total UHI warming. Secondly, the UHI intensity increases with the expansion of urban form area; and in general, gross area of urban form is positively correlated with highest UHI temperature value and total UHI warming. Thirdly, dispersion of the urban form and contagion index are not apparently involved with highest UHI temperature, but correlated with total UHI warming. Fourthly, plague area has a positive relationship with UHI intensity; with a single plague over 50 km<sup>2</sup>, highest UHI temperature value will grow rapidly by the linear along with the increase of plague and a quadric curve correlation between plague area and total UHI warming is obtained. Fifthly, there was a negative relationship between perimeter-to-area ratio of the plaque and UHI intensity and a S curve correlation between perimeter-to-area ratio of the plaque and highest UHI temperature value. When the ratio is between 0.005 to 0.04, a quadric curve

收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家自然科学基金(51278330);中英科研合作伙伴关系项目(201223)

作者简介:黄焕春(1983-),男,博士,主要从事城市物理环境研究,(E-mail)huanghc295@163.com。

运迎霞(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)yunyx@126.com。

correlation will be formed between perimeter-to-area ratio and highest UHI temperature value. Finally, urban form fractal dimension is positively relevant with UHI intensity and in a linear relationship with highest UHI temperature and a cubic curve relationship with Total UHI warming.

**Key words:** layout parameters; urban form; UHI intensity; total UHI warming; highest UHI temperature value

自 20 世纪 90 年代,城市化快速发展,城市形态面积迅速扩大<sup>[1-3]</sup>,大量的农用地转变为城市用地,下垫面主要地物代之以高储热的沥青、水泥路面、人工建筑物,这就必然导致城市温度高于郊区,加剧了城市热岛现象。城市形态是由面积、边界形状、空间分布不同的斑块构成,其景观格局过程与热岛效应的时空变化有着紧密的联系。城市形态可透过景观格局影响热岛强度变化,因此定量研究城市形态的景观、格局、过程的空间特征意义重大。

长期以来,热岛效应的研究利用有限的地面气象观测点,无法准确全面地反映城市地面温度场的分布变化。因此,需要引入遥感卫星影像,同时监测大范围的城市区域温度场。而从目前的数据处理与研究方法来看,比较典型的方法是采用拉线法,但样线所经地区城市地物不存在均质性或线性递增,因而也无法准确测算城市热岛效应的景观格局特征,并且该方法获取数据样本有限。采用 MATLAB 大型数据计算分析软件,计算分析研究区所有数据点,增加数据分析的准确性,成为一种新的城市热岛研究工具方法。

笔者历数目前热岛效应文献和研究综述<sup>[6-11]</sup>,发现:鲜有从宏观斑块景观尺度,对城市形态布局参数与热岛效应的强度进行研究。笔者首先提出热岛强度的双指标概念。然后基于天津市近 22 a 的 7 景夏季遥感影像,利用 ENVI、ArcGIS、MATLAB 大数据计算分析软件,研究城市形态布局的景观格局参数对热岛强度的影响。探讨通过城市形态格局过程的优化,大大降低热岛强度,减少夏季人工降温带来的碳排放量,以期为城市形态布局规划提供参考。

## 1 研究区与相关概念

### 1.1 研究区概况

研究区为天津市主城区,是华北地区的典型大城市,属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候区,主要受季风环流支配,是东亚季风盛行的地区。夏半年太平洋副热带高压加强,气温高,降水也多,以偏南风为主。在快速城市化中,天津的城市人口规模不断膨胀,由 1992 年的 499 万增加到 2011 年的 1 355 万。城市形态迅速扩大,面积由 1992 年的 280 km<sup>2</sup>,扩张到 2013 年的 936 km<sup>2</sup>。城市形态演化具有典型性,热岛效应空间格局变化明显。

### 1.2 研究数据与处理

采用的原始数据为 landsat TM 卫星遥感影像数据,分别为 1992 年 7 月 30 日 10:11、1999 年 8

月 11 日 10:40、2001 年 7 月 7 日 10:28、2006 年 7 月 21 日 10:40、2009 年 8 月 30 日 10:37、2011 年 8 月 20 日 10:36、2013 年 7 月 24 日 10:49。卫星过境时间均为上午工作最佳时间,遥感影像分辨率为 30 m,其中热波段为 120 m;同时配合 1996 版、2005 版、2013 版天津城市总体规划图与现状图。

原始数据处理:首先,将城市规划图、城市现状图等扫描,进行几何精校正,校正过程采用二次多项式,并用 3 次卷积法进行灰度插值,校正误差均小于一个像元。然后,将天津影像和图件统一校正到 2011 年 TM 卫星影像上,统一投影为 WGS\_1984\_UTM\_50N,误差控制在 20 m 以内,以便保持数据的一致性。最后,利用 ArcGIS 软件,建立研究数据库,并对不同时期的数据进行提取和统计分析。

### 1.3 热岛强度定义

热岛强度是用来表示城区相对于乡村的增热程度。通常热岛强度定义为城市中心区与郊区的温度差值,但是这一定义只是反映了局部中心点与乡村的温度差别,却不能反映出给城市总体带来的增热量的问题。因此提出,最高热岛升温 and 热岛升温总量的双指标热岛强度定义。

最高热岛升温,即通常所说的热岛强度,一般定义为城市中心区与郊区的温度差值<sup>[12]</sup>。其计算有以下几种:一种是将郊区若干平均温度与市中心若干平均温度的差值定义为热岛强度<sup>[13-14]</sup>,其无法反映城市发展带来的最高热岛升温;另一种是,将郊区典型温度与市中心典型最高温度之差作为热岛强度的<sup>[15-16]</sup>,但是很难找到不受到城市影响的原始自然状态的农村典型站点 preurban,因此郊区温度采用一个典型值难以把握研究。

上述几种计算方法,均存在受资料和观测条件的限制,其观察结果不同、可比性也较差、计算中带有不确定性的问题。因此笔者提出将市中心最高温度与郊区农村平均温度作为热岛强度指标之一,热岛效应带来的城市局部最高上升温度,亦称最高热岛升温。其计算公式为

$$\max \Delta T_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_R \quad (1)$$

式中: $\Delta T_{ij}$  为空间位置  $ij$  上的热岛强度; $T_{ij}$  为空间位置  $ij$  上的地表温度; $\bar{T}_R$  为从 8 个郊区方向平均抽取的 32 个农村点的平均温度。

另一个热岛强度指标是热岛升温总量。它反映一定空间分辨率下,热岛效应给城市带来的总体增热量。其计算式为

$$T = \frac{a \times \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij}}{10\ 000} \quad (2)$$

式中:  $T$  为热岛升温总量,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{ha}$ ;  $x_{ij}$  为空间位置  $ij$  上的局部热岛强度, 计算公式为  $\Delta T_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_R$ ;  $a$  为每个栅格的面积。

## 2 分析与结果

### 2.1 城市提取与温度反演

2.1.1 城市形态提取 城市形态的提取较复杂, 城市建筑反射电磁波谱具有明显的异质性, 简单地利用 landsat 原始光谱波段来提取建筑用地, 往往很难获得满意的精度。提取的建设用地往往需要进行大量的后续处理。因此, 提出了在不摒弃原始 6 个

光谱波段的基础上, 同时叠加采用 3 个新专题指数波段——土壤调节植被指数 SAVI<sup>[18]</sup>, 归一化建筑指数 NDBI<sup>[19]</sup>、改进型归一化水体指数 MNDWI<sup>[20-21]</sup>, 进行城市形态的提取, 这样能明显提高建筑用地信息的提取精度。

利用波段 5、4、2 组建的假彩色图像进行感兴趣选取, 按城市用地、农用地、林地、水体进行监督分类。将 SAVI、NDBI、MNDWI 指数复合叠加原来波段 7、5、4、3、2、1, 利用最小距离法进行监督分类。数据分类结果显示生产者精度为 93.86%, 用户精度为 95.62%, kappa 系数为 0.93。利用其它专题地图等资料对数据进行分类后处理, 通过人工目视判读来修正错分、误分的城市形态。最终城市形态提取精度达到 93% 以上。最后, 城市形态提取见图 1。

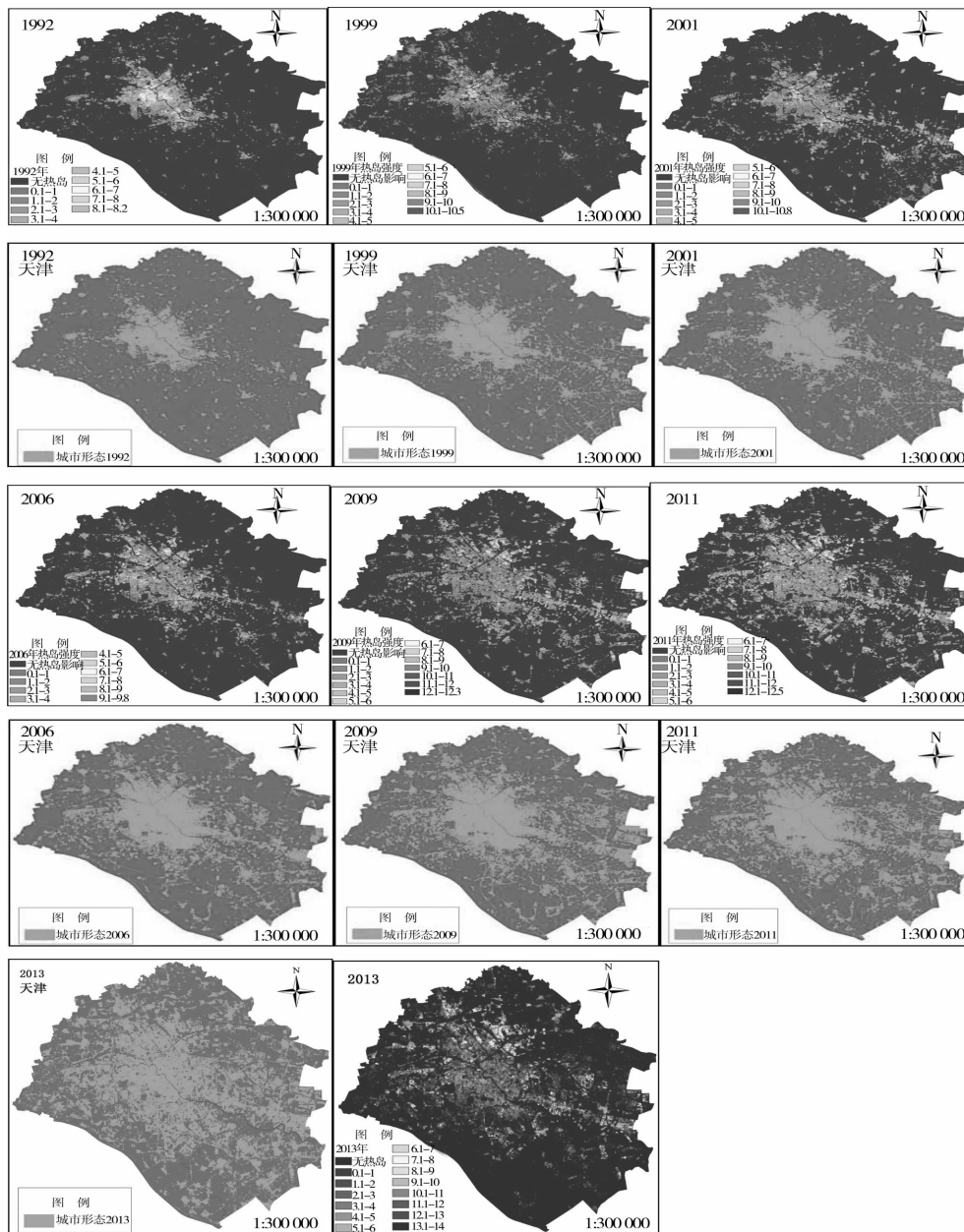


图 1 1992~2013 年天津热岛升温与城市形态

2.1.2 温度反演结果 地表温度反演采用基于影像反演算法(IB算法)<sup>[22-23]</sup>,该算法简单准确并且数据易获得。首先,依据 NASA 数据使用手册,计算 landsat 影像亮度温度;然后,在 ENVI 软件中计算植被指数(NDVI)和植被覆盖度;第 3 步,计算比辐射率,采用覃志豪等<sup>[24]</sup>、黄初冬等<sup>[25]</sup>提出的比辐射率  $\epsilon$  计算方法;最后,计算地表温度,地表温度 LST 计算公式为

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T / \rho) \ln \epsilon} - 273.15 \quad (3)$$

式中:  $T$  为亮度温度,  $\lambda$  为 TM6 波段的中心波长  $11.5 \mu\text{m}$ ,  $\rho = h \times \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} \text{ K}$ (其中,斯特藩-波尔兹曼常数  $\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;普朗克常数  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,光速  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )。

根据热岛升温定义,以当期 32 个农村平均温度为郊区基准温度,在 ArcGIS 中计算每个点的热岛升温值,最终可得各年份热岛强度升温图(图 1)。

## 2.2 城市形态总面积与热岛强度

2.2.1 城市形态总面积与最高热岛升温 1992 年天津市城市形态面积为  $280 \text{ km}^2$ ,2013 年增加到  $936 \text{ km}^2$ ;主城区最高热岛升温由 1992 年的  $8.55 \text{ }^\circ\text{C}$  增加到 2013 年的  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ ,增加了  $5.45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由此看来城市形态总面积与最高热岛升温密切相关。计算二者相关系数,结果为 0.967,通过信度水平为 0.00 检验。这说明城市形态总面积与最高热岛升温呈很强的正相关关系。经回归分析发现二者具有幂函数曲线关系,方程为  $Y = 0.008x + 6.4$ ,  $R^2$  为 0.935,  $F$  检验值为 71.34,信度水平通过 0.05 的检验,  $RMSE = 0.515$ ,见图 2。

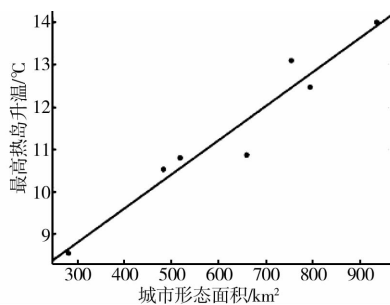


图 2 城市形态总面积与最高热岛升温曲线

2.2.2 城市形态总面积与热岛升温总量 在 ArcGIS 中开发计算模型,利用热岛升温总量式(2),计算 7 年份的夏季热岛升温总量。通过相关系数计算发现,城市形态总面积与热岛升温总量相关系数为 0.815,通过置信度水平为 0.05 的检验。这表明二者呈密切的正相关关系,热岛升温总量随城市形

态的扩张而上升。通过进一步回归分析,发现二者具有线性关系,方程为  $Y = 185.5x - 36050$ ,  $R^2$  为 0.69,方程通过信度水平为 0.05 的检验,  $F$  统计量为 10.1,见图 3。

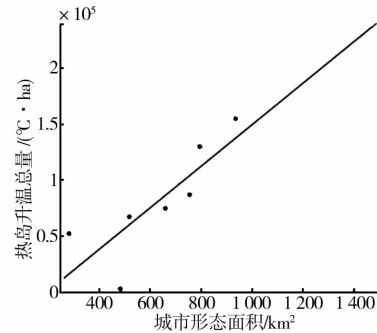


图 3 城市形态总面积与热岛升温总量关系曲线

2.2.3 响应机制分析 热岛强度随着城市形态总面积的增大而上升。总体上,最高热岛升温和热岛升温总量都与城市形态总面积呈线性关系。城市规模的扩大,使大面积的下垫面发生了本质变化,形成了大范围的城市热岛区域,使得地面热岛斑块集聚上升;同时由于建成区建筑物的高度上升,导致了通风难度的加大,再加之人流、物流等要素的集聚,使得热岛影响因素复合叠加,进而加剧了热岛强度的上升。此外,随着城市规模的扩大,其城市地价不断上升,城市各要素资源在空间的集聚增强,高放热的要素也在空间集聚,这也是导致最高热岛升温不断上升的原因。

## 2.3 城市形态离散度和临近度与热岛强度

城市形态的离散度、蔓延度指数,反映了其在空间上的集聚区趋势、与绿地水体的混合状态。利用景观格局分析软件 fragstats 4.1,计算城市形态的离散度与临近度的 64 个景观尺度指数<sup>[26-27]</sup>。

2.3.1 离散度和临近度与最高热岛升温 汇总 1992—2013 年的天津城市形态,计算最高热岛升温与城市形态离散度和临近度的 64 个指数的相关系数,相关系数均没有通过信度水平为 0.05 的双侧检验,这表明城市形态离散度和临近度与最高热岛升温不存在相关性。

2.3.2 离散度和临近度与热岛升温总量 通过计算相关系数,发现反映城市形态的离散度、蔓延度指数 COHESION(内聚力指数)、DIVISION(景观分离度)、MESH(有效网格大小)、AI(聚合度)与热岛升温总量密切相关,均通过了 0.05 的置信度检验(表 1)。通过回归拟合发现:COHESION、DIVISION、MESH、AI 与热岛升温总量具有线性关系(见表 1 和图 4)。

表 1 离散度、蔓延度指数与热岛升温总量相关分析

指数	相关性	显著性(双侧)	回归方程	回归方程 $R^2$	RMSE
COHESION	0.817	0.013	$Y=241\ 900x-24\ 030\ 000$	0.638	0.56
DIVISION	-0.670	0.050	$Y=-1\ 435\ 000x+1\ 455\ 000$	0.753	0.70
MESH	0.771	0.025	$Y=6.897x+19\ 570$	0.753	0.70
AI	0.746	0.034	$Y=28\ 140x-2\ 460\ 000$	0.78	0.73

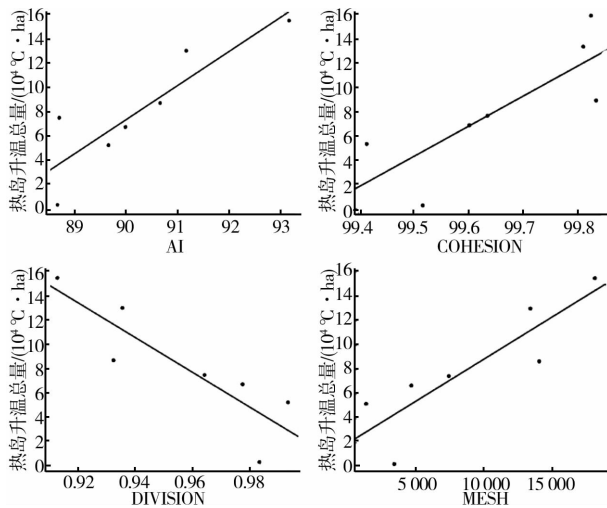


图 4 COHESION、DIVISION、MESH、AI 与热岛升温总量关系

热岛升温总量与 COHESION、MESH、AI 密切相关,这说明随着城市形态自然连通度的增加,斑块分布变得越发聚集,热岛升温总量也在增加。热岛升温总量与 DIVISION 密切相关说明,绿地与城市形态交替出现的规律越明显,城市形态越分散,热岛升温总量就越低。

2.3.3 响应机制分析 从上述分析可以看出,城市形态离散度和临近度的格局、分布、过程的演化,直接影响城市热岛升温总量。当城市形态破碎化程度升高、蔓延度降低时,会使热岛斑块的破碎化程度提高,使高温斑块的距离变远、独立性提高,从而有利于热岛区与非热岛区的能量交换,进而降低热岛升温总量。因此城市形态布局时,应降低 COHESION、MESH、AI 指数,同时提高 DIVISION 指数。

### 2.4 斑块面积、周长面积比与热岛强度

#### 2.4.1 斑块面积、周长面积比与最高热岛升温

汇总 1992—2013 年的城市形态斑块,计算最高热岛升温与斑块面积的相关系数。结果发现:50 km<sup>2</sup> 以下斑块,二者不具有相关性;50 km<sup>2</sup> 以上斑块具有紧密的正相关关系,相关系数为 0.982,通过信度为 0.00 的检验。经回归拟合发现:斑块面积与最高热岛升温具有线性关系,回归方程为: $Y=0.0103x+7.42$ , $R^2$  为 0.93,F 统计量为 162.66,见图 5。这说

明 50 km<sup>2</sup> 以上城市形态斑块面积越大最高热岛升温越高。

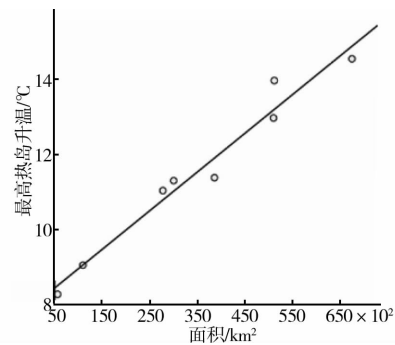


图 5 50 km<sup>2</sup> 以上斑块面积与最高热岛升温

汇总 1992—2013 年的城市形态斑块,计算最高热岛升温与周长面积比的相关系数。相关系数计算结果为-0.393,通过信度水平为 0.00 的双侧检验,这表明二者呈较强负相关关系。通过回归拟合发现,周长面积比与最高热岛升温呈 S 曲线关系,回归方程为  $Y = \exp(-0.774 + 0.0256/x)$ , $R^2$  为 0.233,F 统计量为 1 079.718,见图 6。由回归方程可知:周长面积比越大,而最高热岛升温越低,而且呈指数迅速下降。

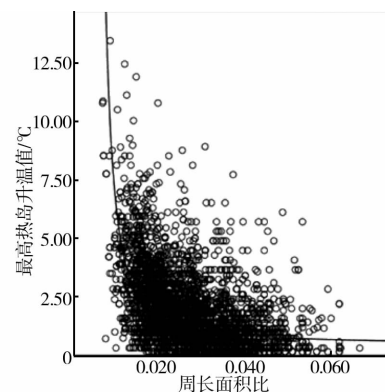


图 6 斑块周长面积比与最高热岛升温曲线

2.4.2 面积、周长面积比与热岛升温总量 汇总 1992—2013 年的城市形态斑块,计算斑块面积与热岛升温总量的相关系数。相关系数计算结果为 0.958,通过信度水平为 0.00 的双侧检验,二者呈很强的正相关关系。回归方程为  $Y=0.1969x^2+$

$53.94x+603.2$ ,  $R^2$  为 0.95,  $F$  统计量为 248.78, 见图 7。这说明城市形态斑块面积越大最高热岛升温越高。

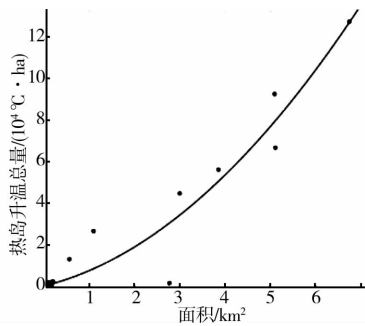


图 7 斑块面积与热岛升温总量

汇总 1992—2013 年的城市形态斑块, 计算斑块周长面积比和热岛升温总量的相关系数。相关系数计算结果为  $-0.46$ , 通过信度水平为 0.00 的双侧检验, 二者呈负相关关系。当周长面积比是  $[0.005, 0.04]$  时, 回归方程为  $Y=2.482 \times 10^{11}x^4 - 2.715 \times 10^{10}x^3 + 1.074 \times 10^9x^2 - 1.82 \times 10^7x + 1.116 \times 10^5$ ,  $R^2$  为 0.266,  $F$  统计量为 348.78, RMSE 为 1782, 见图 8。这说明城市形态斑块面积越大最高热岛升温越高。

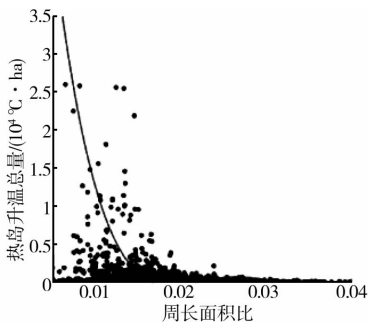


图 8 斑块周长面积比与热岛升温总量

**2.4.3 响应机制分析** 热岛强度随着斑块面积增大而上升。这主要是因为, 产生热量的斑块面积越大, 聚集热量越多, 温度也就越高。由于  $50 \text{ km}^2$  以下斑块与热岛强度不具有稳定性, 这主要是因为: 功能布局设计均具有很大的不确定性, 有些放热性产业往往单独布局, 而又有些  $50 \text{ km}^2$  以下斑块, 能较好的接受郊区通风, 散热也较为容易。

热岛强度随着周长面积比增大而降低。周长面积比越大, 相同面积斑块的周长越大, 斑块边界就越长, 就越有利于城市形态斑块的降温。但并不是该指数越大越好, 它在不同的区间降温效率不同, 当该指数小于 0.3 时降温效率较高, 当大于 0.3 时就趋于平稳接近极限。

周长面积比与热岛强度的相关系数远小于面积指数, 这说明热岛效应对斑块面积的变化敏感性强于周长面积比。这主要是因为热岛强度与周长面积比反应了城市形态斑块与郊区的边缘热量交换。

## 2.5 城市形态分维数与热岛强度

利用景观格局分析软件 fragstats 4.1 计算城市形态斑块的分维数, 再利用 ArcGIS 软件计算每个斑块内的热岛强度值。

**2.5.1 分维数与最高热岛升温** 将 1992—2013 年的城市形态斑块, 进行分维数与最高热岛升温的相关分析。结果相关系数为 0.25, 相关性通过信度水平为 0.001 的双侧检验。这表明最高热岛升温与分维数呈较强的正相关关系。通过回归分析, 发现二者呈线性关系, 回归方程为  $y=35x-36.3$ ,  $R^2$  为 0.235,  $F$  统计量为 23.51, 见图 9。这表明, 随着城市形态斑块分维数的增大, 最高热岛升温也相应的增大。

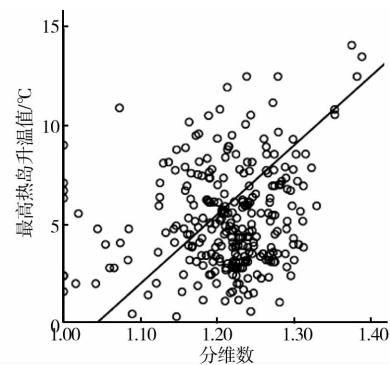


图 9 斑块分维数与最高热岛升温

**2.5.2 斑块分维数与热岛升温总量** 汇总 1992—2013 年的城市形态斑块, 计算分维数与热岛升温总量的相关系数。相关系数计算结果为 0.326, 相关性通过信度水平为 0.00 的双侧检验。这表明两个指数都呈较强正相关性。  $2 \text{ km}^2$  以上斑块的, 回归方程为

$$Y = 1.139 \times 10^7 x^3 - 3.988 \times 10^7 x^2 + 4.632 \times 10^7 x - 1.785 \times 10^7$$

方程的  $R^2$  为 0.678, 回归方程通过信度 0.05 的检验, RMSE 为 9991, 见图 10。这表明城市形态斑块分维数越大热岛升温总量越高, 在分维数为  $[1.05, 1.3]$  时变化较为平稳, 而分维数超过 1.3 后, 热岛升温总量迅速上升。

**2.5.3 响应机制分析** 热岛强度随着城市形态分维数的增大而上升。通过观察发现: 分维数越高的城市形态斑块, 结构越复杂, 在外围出现较多的环绕城市形态的边枝触角, 有的生长成了较宽的条带,

并且条带间距离较近。这样影响了城市形态内部的通风,导致内部热量不断积聚。同时,边缘条带或角度的斑块热量,又复合叠加到了所在斑块的中心区域。这就是分维数影响城市热岛强度的机制。

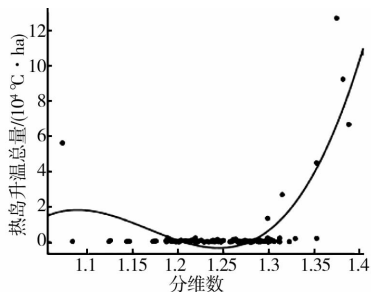


图 10 斑块分维数与热岛升温总量

### 3 结 论

以天津市 1992—2013 年的热岛景观空间格局为例,定量分析了热岛强度与城市形态面积、离散度、临近度、分维数、形状指数等的作用机制,明确了与热岛强度密切相关的布局参数曲线,通过研究得出以下结论:

1) 提出了热岛强度的双指标测度的概念算法,即最高热岛升温 and 热岛升温总量。有效解决了热岛强度的测度问题,既能表示热岛效应带来的最高温度上升值,又能表示热岛带来的增热量的度量问题。

2) 热岛强度随着城市形态总面积的增大而上升。城市形态总面积与最高热岛升温呈线性方程为  $Y=0.008x+6.4$ ; 与城市热岛升温的线方程为  $Y=185.5x-36050$ 。

3) 最高热岛升温与城市形态离散度、临近度不存在明显相关性;但热岛升温总量与其呈线性关系,与 COHESION 的方程为  $Y=241900x-24030000$ , 与 DIVISION 的方程为  $Y=-1435000x+1455000$ , 与 MESH 的方程为  $Y=6.897x+19570$ , 与 AI 的方程为  $Y=28140x-2460000$ 。

4) 热岛强度随斑块面积的增大而上升,  $50 \text{ km}^2$  以上斑块面积与最高热岛升温具有线性关系,回归方程为  $Y=0.0103x+7.42$ ; 斑块面积与热岛升温总量呈二次曲线关系,方程为  $Y=0.1969x^2+53.94x+603.2$ 。

5) 热岛强度随周长面积比的增大而减小。周长面积比与最高热岛升温成 S 曲线关系,方程为  $Y=\exp(-0.774+0.0256/x)$ ; 当周长面积比是  $[0.005, 0.04]$  时,其与热岛升温总量的呈四次曲线关系。回归方程为  $Y=2.482 \times 10^{11}x^4 - 2.715 \times 10^{10}x^3 + 1.074 \times 10^9x^2 - 1.82 \times 10^7x + 1.116 \times 10^5$ 。

6) 热岛强度随斑块分维数增大而升高。分维数与最高热岛升温呈线性关系,回归方程为  $y=35x-36.3$ ; 分维数与热岛升温总量呈三次曲线关系,方程为  $Y=1.139 \times 10^7x^3 - 3.988 \times 10^7x^2 + 4.632 \times 10^7x - 1.785 \times 10^7$ 。

#### 参考文献:

- [1] 房国坤,王咏,姚士谋. 快速城市化时期城市形态及其动力机制研究[J]. 人文地理, 2009, 24(2): 40-43.  
Fang G K, Wang Y, Yao S M. Study on urban morphology and its dynamic mechanism in the period of rapid urbanization [J]. Human Geography, 2009, 24(2): 40-43.
- [2] 熊国平. 90 年代以来我国城市形态演变的特征[J]. 新建筑, 2006(3): 18-21.  
Xiong G P. The Characteristics of urban morphology evolution in China since 1990s [J]. New Architecture, 2006(3): 18-21.
- [3] 王德利,方创琳. 城市化发展质量研究进展及展望[J]. 现代城市研究, 2012(7): 15-21.  
Wang D L, Fang C L. Progress and prospect of study on urbanization development quality [J]. Modern Urban Research, 2012(7): 15-21.
- [4] 陈利顶,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.  
Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [5] 陈爱莲,孙然好,陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.  
Chen A L, Sun R H, Chen L D. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [6] 寿亦莹,张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353.  
Shou Y X, Zhang D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 338-353.
- [7] 史军,梁萍,万齐林,等. 城市气候效应研究进展[J]. 热带气象学报, 2011, 27(6): 942-951.  
Shi J, Liang P, Wan Q L, et al. A review of the progress of research on urban climate [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(6): 942-951.
- [8] Ren C, Ng E Y, Katzschner L. Urban climatic map studies: a review [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(15): 2213-2233.



- [9] Weng Q H. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications and trends [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.
- [10] 黄良美, 邓超冰, 黎宁. 城市热岛效应热点问题研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(4): 54-58.  
Huang L M, Deng C B, Li N. A review on the hotspot issues of urban heat island effect [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2011, 27(4): 54-58.
- [11] 宫阿都, 徐捷, 赵静, 等. 城市热岛研究方法概述[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(6): 96-99.  
Gong A D, Xu J, Zhao J, et al. A survey of study method for urban heat island [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(6): 96-99.
- [12] Oke T R. City size and the urban heat island [J]. *Atmospheric Environment*, 1976, 7: 769-779.
- [13] 李春梅, 陈新光, 唐力生, 等. 广州市 2005 年热岛强度变化特征[J]. *广东气象*, 2006(4): 30-33.  
Li C M, Chen X G, Tang L S. Characteristics of Urban Heat-island Intensity of Guangzhou in 2005 [J]. *Guangdong Meteorology*, 2006(4): 30-33.
- [14] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(7): 882-886.  
Lin X C, Yu S Q, Tang G L. A Study on the relationship between urbanization and urban heat island intensity in Beijing [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(7): 882-886.
- [15] 李丽光, 王宏博, 贾庆宇, 等. 辽宁省城市热岛强度特征及等级划分[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1345-1350.  
Li L G, Wang H B, Jia Q Y, et al. Urban heat island intensity and its grading in Liaoning Province of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1345-1350.
- [16] Lowry W P. Empirical estimation of the urban effects on climate: A problem analysis [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(2): 129-135.
- [17] 夏叟, 李云梅, 王桥, 等. 无锡市城市扩张与热岛响应的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(5): 677-683.  
Xia R, Li Y M, Wang Q, et al. Urban expansion in Wuxi city and heat island response by RS analysis [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(5): 677-683.
- [18] Huete A R. A soil adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [19] Zha Y, Gao J, Ni S X. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583-594.
- [20] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.  
Xu H Q. A Study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.
- [21] 徐涵秋, 杜丽萍, 孙小丹. 基于遥感指数的城市建城区界定与自动提取[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(5): 707-712.  
Xu H Q, Du L P, Sun X D. Index-based definition and auto-extraction of the urban built-up region from remote sensing imagery [J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2011, 39(5): 707-712.
- [22] Qi H W, Deng S L, Jacquelyn S. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(11): 467-483.
- [23] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.  
Xu H Q. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [24] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. *国土资源遥感*, 2004(3): 28-42.  
Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. the estimation of land surface emissivity for landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004(3): 28-42.
- [25] 黄初冬, 邵芸, 李静. 北京城市地表温度的遥感时空分析[J]. *国土资源遥感*, 2008, 3(9): 64-68.  
Huang C D, Shao Y, Li J. A temporal and spatial analysis of land surface temperature in Beijing utilizing remote sensing techniques [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 3(9): 64-68.
- [26] 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 93-139.
- [27] 付博杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 55-115.