

上海市人类活动对热环境的影响

岳文泽¹, 徐建华²

(1. 浙江大学土地管理系, 杭州 310029;

2. 华东师范大学地理系, 教育部地理信息科学重点实验室, 上海 200062)

摘要: 随着城市规模不断扩张, 由城市热岛现象而导致的热环境问题不断凸现。城市热环境的时空变化, 是下垫面改变、人为热释放和环境污染等人类活动因素相互交织作用的结果。由于城市热环境影响因子的复杂性, 传统观测手段和统计方法在获取数据和分析人类活动对热环境响应机制方面存在着局限性。而卫星遥感和 GIS 技术为人类活动对城市热环境的影响分析提供了技术支撑。选用 Landsat ETM+ 影像, 以上海市外环内区域为研究靶区, 在探讨热环境的空间格局基础上, 运用空间主成分分析方法替代传统的多准则判断 (MCE) 方法, 分析了人类活动对城市热环境的影响特征。结果发现, 对于上海主城区而言, 城市建筑与人口密度、工业区布局、下垫面类型以及城市景观多样性四个因子是影响城市热环境空间格局的主导因子; 四个因子的线性模型, 较好地模拟了热环境的空间变化, 定量揭示了上海城市人类活动对热环境的影响机制。

关键词: 城市热环境; 影响因子; 主成分分析; 上海

1 引言

近 50 年来, 全球城市化进程不断加快, 由城市扩展而产生的温度与其他气候要素变化, 已经引起了全世界的广泛关注^[1, 2]。在我国, 随着 20 世纪 80 年代以来城市化速度显著加快和人类活动加剧, 城市增温现象日趋严重, 因此也受到越来越广泛的重视^[3, 4]。城市热环境效应增强导致城市空气质量下降、降水分布与频率受到影响、污染增加, 从而进一步威胁居民健康, 也使得抵御这种城市病态气候环境所投入的人工能源增多。因此, 揭示城市人类活动对热环境的影响特征, 缓解热环境效应的影响, 对于了解人类活动影响城市气候的规律, 降低城市环境污染、控制能耗, 增进城市居民的健康水平等都具有重要的意义。

人类活动对城市热环境的影响一直是城市热岛研究中重点关注的问题。如 Kim 利用模拟方法, 指出土壤反照率与大气中水汽含量是影响华盛顿特区城市热岛现象的主要因素^[5]。Chrysoulakis 等则分析了工业生产事故导致的雅典城市热岛中的突出热流^[6]。Lo、Weng 与 Wilson 等分别采用线性回归方法, 揭示热岛温度与人工土地利用 / 覆被类型有正相关关系, 与以植被、水体为主的类型有负相关关系; 而与 NDVI 具有显著的负相关关系^[7-9]。Kato 等利用定量模型, 探讨了名古屋市人工热释放与自然热辐射对城市热岛的贡献^[10]。Yuan 等则定量分析了城市热岛温度与不透水表面的关系^[11]。在国内, 张小飞等、武佳卫等分别采用线性回归方法, 分析了城市热岛温度与植被覆盖的定量关系^[12, 13]。季崇萍等则通过定量分析人口密度、城市建成区范围与地表温度的关系, 揭示了北京城市化进程对城市热岛的影响^[14]。上述研究都从不同角度就人类活动对城市热岛的影响进行了分

收稿日期: 2007-07-11; 修订日期: 2007-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701177) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40701177]

作者简介: 岳文泽 (1977-), 男, 副教授, 博士, 中国地理学会会员. 主要研究方向: 城市土地利用与 GIS.

E-mail: yuewenze@163.com

通讯作者: 徐建华 E-mail: jhxu@geo.ecnu.edu.cn

© 2008 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

析。纵观国内外相关研究文献,大多是从单要素出发,探讨城市景观格局对热岛的影响;而从多要素出发,探讨人类活动对城市热环境综合影响的定量研究还比较少见。本文的主要目标是,从多要素综合作用的角度,采用多元统计分析方法,研究人类活动对城市热环境的影响。

2 资料与方法

传统城市热环境研究主要利用有限的地面气象站提供的气温观测资料,通过城乡气温的历史对比分析来研究城市热环境效应^[15-17]。这种根据有限观测点的研究很难全面地掌握城市热环境的分布格局。随着空间信息科学的发展,热红外遥感技术已经成为监测城市热环境可靠手段^[18]。尤其是 ETM+ 热红外影像资料很大程度提高了空间分辨率,为更准确地反映城市热环境信息提供了数据基础。

本文利用 ETM+ 热红外波段遥感影像提取城市热环境信息,同时结合其他资料获取了多个相关影响因子。在分析城市热环境的空间格局特征基础上,选取适宜的研究尺度,运用空间主成分分析方法,筛选人类活动影响城市热环境格局的主因子,建立城市热环境格局成因的统计模型,揭示城市人类活动对热环境影响特征。

2.1 区域与数据

上海市人口密集、经济发达,人类活动对城市环境与土地利用格局影响深刻。伴随着城市的扩展,城市热岛面积逐渐扩大,热环境问题日趋突出。研究人类活动对上海市热环境的影响,具有典型意义。

主要数据为 2000 年 6 月 14 日 Landsat7 的 ETM+ 影像,全球参照系统编号为 (P118, R38; P118, R39)。对影像的 1-5、7 波段与 6 波段分别进行几何校正,运用双线性插值对其进行重采样,统一输出栅格大小为 30m×30m 的影像。其他数据还包括 2000 年的航空遥感数据,行政区划、交通等基础地理数据,土地利用数据以及人口普查统计数据。所有数据空间化以后,都统一到上海地方坐标系。

2.2 研究方法

2.2.1 城市热环境信息提取 根据 Landsat 用户手册中提供的辐射校对方程,首先将 ETM+ 影像热波段的像元值 (DN) 转化成相应的辐射值 L_λ ,再将其反演为辐射亮温,公式如下:

$$L_\lambda = \text{gain} \times \text{DN} + \text{offset} \quad (1)$$

$$T = K2 / \ln(K1/L_\lambda + 1) \quad (2)$$

式中: gain 为增益系数 (单位: $(\text{W}/\text{m}^2\text{sr}\mu\text{m})/(\text{DN})$); offset 为偏移系数 (单位: $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}\mu\text{m}$); L_λ 为热辐射强度值; T 为辐射亮温 (单位: K); K1、K2 均为校订系数。

对于 ETM+ 图像, $K1 = 666.09\text{mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, $K2 = 1282.7\text{K}$ 。而 gain 与 offset 值均可在 Landsat 影像头文件中直接获得。

然而自然界中的大部分物体并非黑体,故用比辐射率 (ϵ) 对其进行校正,使之转换为地表温度,公式如下:

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

$$\rho = hc / \lambda = 1.438 \times 10^{-2} \text{mk} \quad (4)$$

式中: T_s 为地表温度 (单位: K); T 为辐射亮温 (单位: K); λ 为有效波谱范围内的最大

灵敏度值，根据 Markham 与 Barker 的研究， $\lambda = 11.5\text{ }\mu\text{m}$ ； $\delta = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$ ，为玻尔兹曼常数^[19]； $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{ Js}$ ，为 Plank 常数； $c = 2.998 \times 10^8\text{ m/s}$ ，为光速。由于城市地表 ε 取值的复杂性，一般采用简化方法，如 Weng (2001) 研究认为，通常情况下，有植被覆盖的地表取 $\varepsilon = 0.95$ ，没有植被覆盖的地表取 $\varepsilon = 0.92$ ^[20]。

2.2.2 城市热环境影响因子的选取与计算 人类活动对城市热环境的影响主要可归结为如下两方面：第一，促进城市热环境强度增加的因素被加强。主要是由于城市规模不断扩大和发展，下垫面性质被改变；城市人口稠密，衣、食、住、行、汽车尾气、工业化生产等过程中消耗了大量的石油、煤、电等能源，产生直接加热大气的人为热；空气污染、粉尘增加、CO₂ 浓度增加引起温室效应。第二，有利于减少城市热环境强度的因素被削弱。例如，城市中缺乏高大的树木以及灌木和草地；建筑物阻碍空气流通，风速减小；城市中水体缺乏，蒸发量少，植被缺乏，蒸腾量也少。此外，街道走向，通达程度也影响着城市的热环境效应^[21]。确定影响因子指标体系如表 1。

各二级指标的具体含义与计算过程如下：

(1) 建筑密度，也称建筑覆盖率，是指建设用地范围内所有建筑物的基底面积之和与建设用地面积之比。

(2) 建筑容积率指的是建筑项目用地范围内总建筑面积与项目总用地面积的比值。建筑密度、建筑容积率两个指标都是通过航空遥感影像，以街区为单位解译并计算得到。

(3) 交通密度，交通密度以道路为衡量标准，按照不同的道路等级，分配不同的权重，利用 Arc/Info 的线密度函数实现交通密度的计算。公式如下：

$$R_d = ((L_1 \times V_1) + (L_2 \times V_2) + \dots + (L_n \times V_n)) / (\text{area})$$

(5)

式中： $L_1 \dots L_n$ 为落入搜索范围内的 n 条道路各自的长度， $V_1 \dots V_n$ 为对应于上述道路的道路权重， area 为搜索范围的面积。考虑到研究区域的实际情况，将该搜索范围定义为半径为 200 m 的圆形。

(4) 人口密度，人口密度反映人口在地域分布稠密程度。研究所采用人口密度的统计单元为居住小区。

(5) 不可渗透面比率，城市中不透水面在每个像元中的百分比。

(6) 植被盖度，植被盖度则是指植被在每个像元内的百分比。

不可渗透面比率、植被盖度两个指标均是运用线性光谱分解技术得到。线性光谱分析本质上是一种基于光谱分解的图像处理方法，它假设每一光谱波段中单一像元的反射率为各端元组分特征反射率与它们各自比率的线性组合。其数学模型可以表示为：

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + ER_i$$

(6)

式中： $i = 1, \dots, m$ (光谱波段数)； $k = 1, \dots, n$ (端元组分数)； R_i 为第 i 波段像元反射率； f_k 为一个像元内第 k 个端元所占的比率； R_{ik} 表示一个像元内端元 k 在第 i 波段上的反射率。 ER_i 是第 i 波段的误差^[22]。 f_k 可以通过有约束条件的最小二乘法求解。植被盖度通过植被端元可以直接获取，而不可渗透面比率则需要通过高低反照度端元的关系，由二者计算得到^[23]。具体通过遥感软件 ENVI 实现。

(7) 工业区密度，是指一定幅度范围内工业区面积的比重。本研究采用 GIS 中 Zone 统计，计算整个研究区域内的工业区密度。利用 500 m×500 m 大小的网格覆盖整个研究

表 1 城市热环境影响因子的指标体系

Tab. 1 The index system for influencing factors of urban thermal environment

一级指标	城市下垫面建设规模	人类活动强度	生态环境治理
二级指标	建筑密度	人口密度	植被指数
	建筑容积率	交通密度	植被盖度
	不可渗透面比率	工业区密度	景观生态多样性

区域，统计每个网格内工业用地的比重。

(8) 植被指数，植被指数是不同遥感光谱波段间的线性和非线性组合，是反映绿色植被的相对丰度和活性的辐射量值。在本研究中采用 RDVI 计算研究区域内的植被指数。

(9) 景观多样性指数 (SHDI)。本研究采用的是 Shannon 多样性指数，SHDI 越大代表景观类型越丰富，均匀度越高。SHDI 是利用城市 1:10000 土地利用现状图，在景观格局统计软件 Fragstats 中计算得到。

2.2.3 主成分分析 (PCA) 城市热环境受到人类活动多种形式的综合影响，因此，将多个指标归纳为几个变量进行评价，一直是值得探讨的问题。主成分分析就是一种不掺杂主观意识的客观评价方法，并经过数学分析生成权重值，从而确定每个样本的贡献率。同时它又是一种降维技术，把多维向量简化为数量更少的综合因素，即多元变量系统中的主成分，并且通过旋转使得主成分之间互不相关，从而确定主成分的现实含义。利用 PCA 可以生成一系列独立不相关的新变量 (主成分)。新变量摆脱了多准则判断 (MCE) 权重不合理的弊端，并能方便地使用更广泛的空间变量。

主成分分析原理是通过正交旋转变换来消除数据相关性或冗余度^[24]。正交旋转式为：

$$pc_{ij} = \sum_{k=1}^n X_{ik} E_{kj} \tag{7}$$

式中： pc_{ij} 是对应于空间单元 i 的第 j 个主成分； X_{ik} 是对应于空间单元 i 的第 k 个准则； E_{kj} 是对应于第 k 行第 j 列的特征向量矩阵。特征向量和特征值可以由下列方程来求解：

$$E \text{cov} E^T = V \tag{8}$$

式中： Cov 是协方差阵； V 是以特征值为对角值的矩阵； E 是特征向量矩阵；在实际应用中，确定主成分个数的基本条件是满足主成分的贡献率与累计贡献率之间均衡。通常，当累计贡献率大于 85% 时是可取的^[25]。

传统 PCA 方法，每个变量是一个向量，常规的统计分析软件都可以实现。而空间数据主成分分析的每个空间变量则对应一个矩阵，常规统计分析软件显然无法操作。本文在 Arc/Info GRID 模块的支持下，使用 GRID 模块下的空间主成分函数实现了对影响城市热环境空间变量的主成分分析

2.2.4 数据处理 在对城市人类活动影响城市热环境的多要素综合分析中，考虑到栅格数据虽然存储量大，但叠加容易，逻辑代数运算简单^[26]，比矢量数据更易于应用。因此本文所有计算分析，均以栅格数据为基础，实现空间分析的各种代数和逻辑运算。由于主成分分析中，要求变量在空间采样上相互独立，而实际上，地理要素之间必然存在一定的空间相关与联系。选择适宜的空间采样尺度十分关键。通过比较分析，确定所有变量均采用 500 m×500 m 的空间采样单元。

2.2.5 指标的标准化 城市热环境的多个影响因子，无论从指标的分级值还是从计量单位上看，都不具有可比性^[27]，因此，需要对指标标准化处理。采用级差标准化的方法，对各因子进行处理：

$$(X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \times 100 \tag{9}$$

式中： X_i 为影响因子的实际值； $X_{\min}$ 为研究区域内该因子的最小值； $X_{\max}$ 为研究区域中该因子的最大值。

3 结果与讨论

3.1 城市热环境的空间格局特征

从上海市城市热环境的计算结果看，城市中心区地表温度要远远高于城市边缘区和以农村为主的近郊区 (图 1)，城市热岛效应十分明显。在城市热岛内部，地表温度的差异

也十分显著，浦西的温度明显高于浦东，城市热岛中心（热点区）主要集中在4个区域：黄浦江沿岸的黄浦区、虹口与杨浦区的南部、闸北区内环线外测以及宝山区吴淞口地区。而在热岛内部的江湾湿地、黄浦江面等处形成明显的低温区。

3.2 热环境格局影响因子的空间主成分

上述空间变量涉及人类活动影响城市热环境的各个方面。虽然从总体上可以划分为人为热释放的直接影响和改变地表辐射的间接影响两个方面，但具体要素往往具有重叠性而且相互交织，例如工业区密度既包含了地表辐射的改变又直接释放人为热量。这时利用多准则判断方法分析人类活动对热环境的影响显然不合适。利用空间变量的主成分分析，得到各个主成分的特征值及贡献率(表2)。

表2是城市热环境各个空间变量的主成分分析结果。由于前4个主成分已经包含了原始变量中高达87.359%的信息，认为前4项主成分已经能较好地反映了城市热环境空间格局的组成，说明上海市热环境格局受人类活动影响主要包括4个主因子。同时，说明原变量之间有很高的相关性。

表3显示了每个主成分包含原来9个变量的信息载荷情况。主成分所对应的系数越大，包含原变量的成分越高。由此可以具体分析各个主成分的组成。根据主成分载荷矩阵，对于第一主成分而言，城市建筑密度、建筑容积率和人口密度为该主成分的主要贡献因子，而从表中可以明显看出，植被指数以及植被盖度对第一主成分的贡献为负；对于第二主成分，工业区密度在其中占了较大比重，对其有明显的正贡献，而其他影响因子，诸如植被指数、植被盖度、建筑容积率、人口密度以及交通密度等均对该项主成分产生负影响；对于第三主成分，不可渗透面、植被指数、多样性以及植被盖度为其主要贡献因子，而对第一主成分产生主要影响的建筑容积率则对该主成分产生了负影响；对于第四主成分，景观多样性为其主要贡献因子，

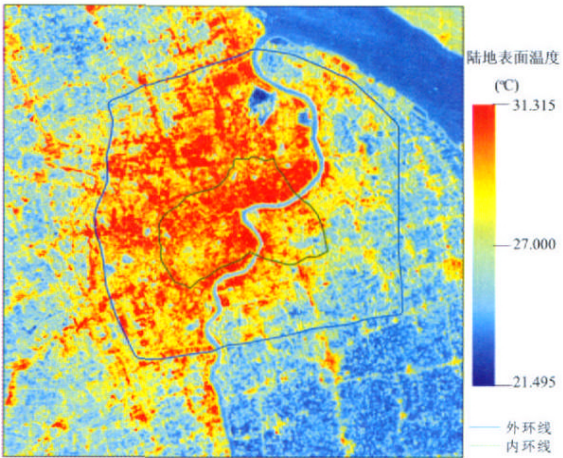


图1 上海市城市热环境的空间格局
Fig. 1 The pattern of urban thermal environment in Shanghai city

表2 主成分的特征值及其贡献率
Tab. 2 Eigenvalues and their contribution rates of the principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	1109.464	45.539	45.539
2	612.265	25.131	70.671
3	232.455	9.541	80.212
4	174.122	7.147	87.359
5	102.209	4.195	91.554
6	88.987	3.653	95.207
7	59.222	2.431	97.638
8	54.840	2.251	99.889
9	2.707	0.111	100.000

表3 主成分得分载荷矩阵

Tab. 3 Principal component score coefficient matrix

热环境 影响因子	第1 主成分	第2 主成分	第3 主成分	第4 主成分	第5 主成分	第6 主成分	第7 主成分	第8 主成分	第9 主成分
不可渗透面	0.3567	0.0873	0.5296	-0.2140	-0.6032	0.3501	0.0390	0.0514	-0.2200
工业区密度	0.0617	0.9215	0.0922	-0.1953	0.2339	-0.1213	-0.1611	-0.0707	-0.0019
建筑密度	0.4143	0.0438	-0.0673	-0.0894	0.2526	-0.0376	0.8648	0.0215	0.0201
建筑容积率	0.4221	-0.1719	-0.0450	-0.2172	0.4947	0.3785	-0.3597	0.4749	0.0126
植被指数	-0.2944	-0.0909	0.5623	-0.2066	0.1587	0.0474	0.1061	0.0460	0.7109
人口密度	0.3620	-0.2605	0.0784	-0.3070	0.1725	-0.1615	-0.2246	-0.7707	0.0210
交通密度	0.2814	-0.1180	0.1990	-0.0395	-0.1188	-0.8254	-0.1286	0.3921	0.0079
多样性	0.2547	0.0461	0.4017	0.8334	0.2310	0.0544	-0.0689	-0.1267	-0.0009
植被盖度	-0.3966	-0.1398	0.4257	-0.1671	0.3880	-0.0735	0.1114	0.0224	-0.6672

而其余各影响因子均对其产生负影响。综合考虑各个主成分的主要贡献因子，对于上海市外环线以内的区域而言，影响城市热环境格局的因子按照作用度大小，可以概况为城市建筑与人口集聚、工业布局、下垫面性质以及城市景观多样性 4 个主因子。即，主成分 I 集中反映了原变量中城市建筑和人口集聚导致温度升高的有关因子，主要包含了建筑密度、建筑容积率和人口密度等信息；主成分 II 则基本反映了工业生产的热量对热环境的影响，主要包含了工业区密度等信息；主成分 III 主要反映了城市地表覆盖改变对热环境的影响，主要是老城区通过旧城改造由植被、水面而转变为不可渗透面，同时在外围城市扩展区域新增的不可渗透面；主成分 IV 主要反映了城市建设与改造中形成的景观多样性对热环境的影响，多样性的信息含量远远大于其他变量。

从 4 个主成分在每一个空间单元上得分的空间分布格局可以看到(图 2)，PCA 变换可以有效的将相关的空间变量对因变量的影响程度分配到相应的主成分因子上。可以发现，第一主成分 (城市建筑和人口集聚)，代表了原来 9 个变量中的 45.54% 的信息，因此第一主成分在空间上基本上可以描述城市热环境的总体格局。高值区主要集中在浦西的城市中心区，表现出的从中心向外减小的带状分布规律。第二主成分由于代表了工业生产对城市热环境的影响，因此，其高值分布与上海市的工业布局相一致的，工业生产是城市热环境的主要热源之一，一定程度上改变了城市热岛的强度和空间分布。第三主成分由于代表城市地表土地覆盖变化情况，特别是不可渗透面比率变化。因为其中植被、水面都对城市热环境具有一定缓解作用，所以高值区主要分布在两种区域，一是城市中心区，

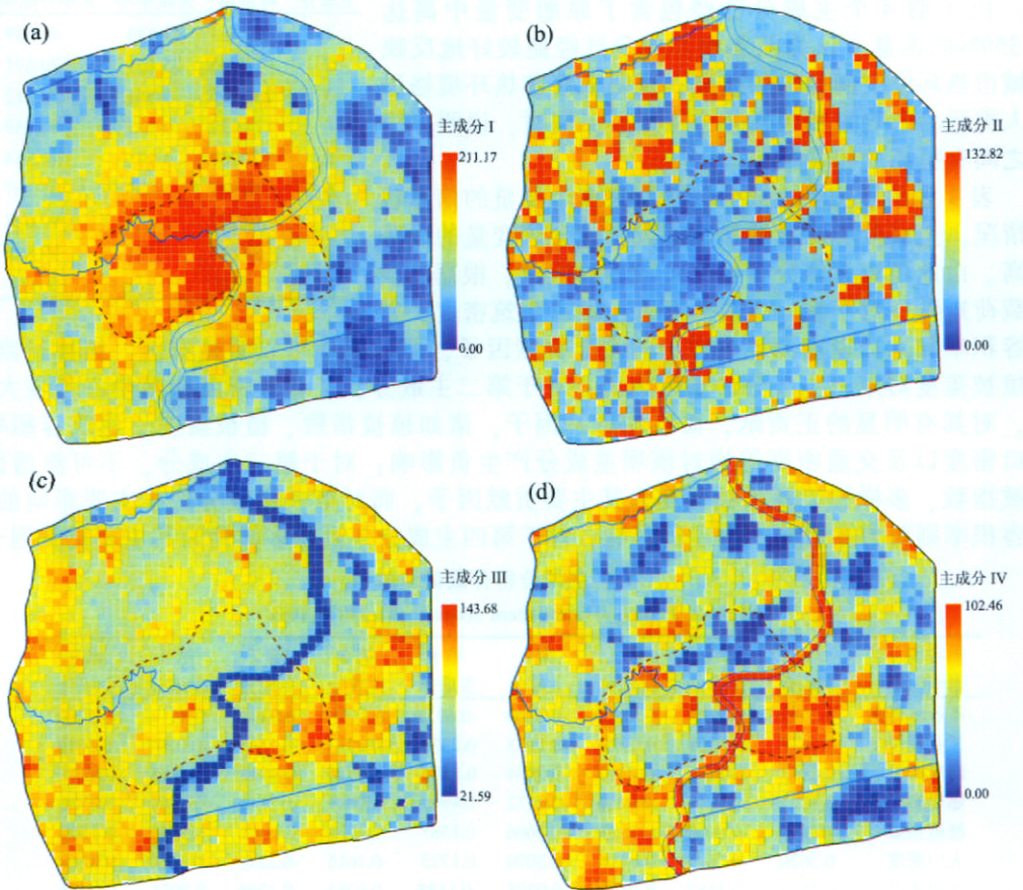


Fig.2 Spatial pattern of the first four principal components

由于旧城改造的新建建筑导致不可渗透面比率增加的区域；二是在城市外围由于城市新近扩展区域，这里植被等非人工建筑覆盖类型迅速下降，而主要变成不可渗透面。从图中可以发现，河流、池塘水面对热场具有明显的抑制作用，所以得分表现为特殊的低值。图上黄浦江以及浦东的一些池塘水面表现最为明显。第四主成分为土地利用景观多样性，在城市内部景观多样性受到经济、社会以及生态多因素共同决定。研究区内 SHDI 高值主要有两个区域，一个是由于具有最高的地价导致景观斑块破碎度较大的城市 CBD 的附近，另外一个是由于处于城市扩展的前缘，景观类型较多的浦东内环线附近^[20]，这两个高值区分别对应着较强的热环境效应。

3.3 城市人类活动对热环境影响的统计分析

从以上主成分分析可以发现，影响城市热环境的因素很多，而得到的四个主成分基本上囊括了影响热环境格局的主导因子。利用主成分分析的结果，确定上海城市人类活动对热环境影响特征模型如下：

$$Y = 0.4554 \times Y_1 + 0.2513 \times Y_2 + 0.0954 \times Y_3 + 0.0715 \times Y_4 \tag{10}$$

式中：Y 即城市热环境分布，Y₁ 为城市建筑与人口分布因子，Y₂ 为工业生产因子，Y₃ 为地表覆盖因子，Y₄ 为景观多样性因子，而各个变量的权重分别对应各主成分的相应贡献率。4 个人类活动主因子对热环境影响的敏感度按照次序逐渐降低。

按照上述模型，则可以模拟出不同城市人类活动强度和范围下的热环境的格局与强度特征。利用空间分析中的地图代数方法，根据上述各个主导因子的得分，动态模拟出上海市城市热环境的空间分布格局 (图 3)。

由图 3 与图 1 比较可以发现，模拟的上海市热环境与实际值总体格局是一致的。中心城区值相对较高，浦东和外围地区值较低，在城区高值区中，也有一些低值区，分别对应着一些公园绿地。总体上看来，模型基本上能解释城市热环境的空间格局差异。但不同是，模拟结果加强了中心城区 (热岛区) 和外围 (非热岛区) 的对比，城市热岛主要集中在浦西内环内的苏州河两岸；另外一个高值区在西部内环外的苏州河北部，沪西工业区附近。受选择主因子的影响，植被覆盖较好的浦东城市外围、新江湾城、共青森林公园以及浦西西北角等处值偏低。由于选择了工业密度因子，在浦东的张江、金桥和外高桥地区值也相对较高，而由于没有选择水面影响的因子，因此黄浦江等水面的值并不是最低，加上河流容易受到邻近区域影响，热环境效应甚至强于外围的农田。可见，对于研究区域内不同的空间样本来说，不同区域人类活动对城市热环境格局影响机制均不相同。通过明确具体每一个空间样本内各个因子的具体作用方式，可为城市热环境的改善与治理提供了更为准确的目标与方向。

为了进一步检验上述统计模型对城市热环境空间格局模拟的效果，在相同的空间样本下，对模型模拟的值与实际值进行了相关分析 (图 4)。发现两者的相关系数达到 0.8250，并且，相关系数在 0.001 的

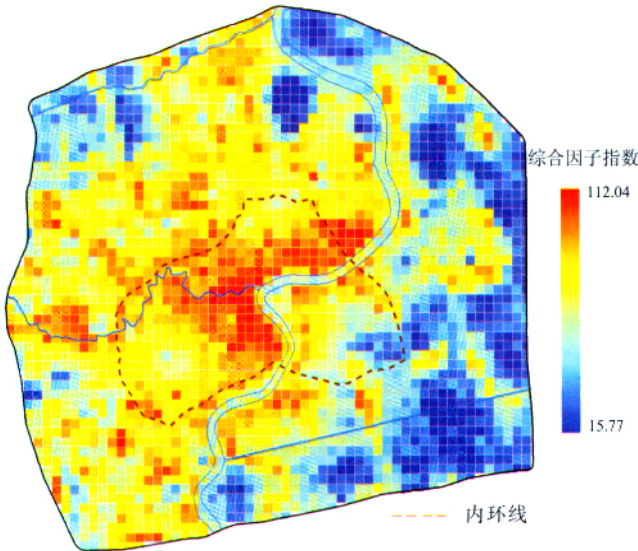


图 3 主成分模拟的上海城市热环境的空间分布

Fig. 3. Simulation result of urban thermal environment by four principal components <http://www.cnki.net>

置信水平上是高度显著的。另外,通过对模拟值与实际值之间的回归分析,发现二者具有较好的线性关系。因此,说明上述主因子在总体水平上较好地揭示了城市热环境空间格局的成因。

4 结 论

本文运用定量遥感技术、GIS 空间分析技术,对上海市城市热环境格局进行分析的基础上,通过空间主成分分析定量揭示了上海城市人类活动对热环境的影响差异、特征与机制。人类活动对城市热环境的影响特征如下:

(1) 热环境空间格局是城市人类活动多要素综合作用结果。虽然人类活动对城市热环境的影响可以划分为通过排放人为热直接影响及通过改变地表热量作用模式间接影响两种主要形式。但是在实际过程中,各种影响方式是交织在一起,相互影响相互作用的。研究所有人类活动对热环境的影响因子,可以归纳为 4 种相对独立的基本要素,城市建筑与人口集聚、工业区布局、下垫面类型以及城市景观多样性。

(2) 4 个相对独立的基本要素,较好的解释了大部分区域人类活动对热环境的影响过程。根据影响强度的大小,城市建筑与人口集聚对热环境影响的敏感性最大,远远高于其他 3 个要素,说明它是目前影响城市热环境的最核心要素,其他 3 个影响强度则逐渐降低。4 个要素的线性模型定量解释了城市人类活动对热环境的影响机制,同时也为模拟具体区域人类活动与热环境的相互作用提供了可能。

(3) 模拟结果揭示了不同区域人类活动对城市热环境的影响特征差异。但由于因子选择还不是很完备,导致一些区域(河流、湖泊水面)热环境与人类活动的作用过程没能正确反映。考虑增加其他影响因子,更科学的揭示人类活动对城市热环境的影响特征是今后进一步工作的方向。

参考文献 (References)

- [1] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1663-1681.
- [2] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 2000, 25: 49-65.
- [3] Zhou Shuzhen, Zhang Chao. On the Shanghai urban heat island effect. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(4): 372-381. [周淑贞, 张超. 上海城市热岛效应. *地理学报*, 1982, 37(4): 372-381.]
- [4] Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing. Research on spatial thermal environment in Shanghai City based on remote sensing and GIS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 139-144. [陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究. *测绘学报*, 2002, 31(2): 139-144.]
- [5] Kim H H. Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(12): 2319-2336.
- [6] Chrysoulakis N, Cartalis C. Thermal detection of plumes produced by industrial accidents in urban areas based on the presence of the heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(14): 2909-2916.
- [7] Lo C P, Quattrochi D A, Luvali J C. Application of high resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(17): 287-304.
- [8] Weng Q H. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(10): 1999-2014.

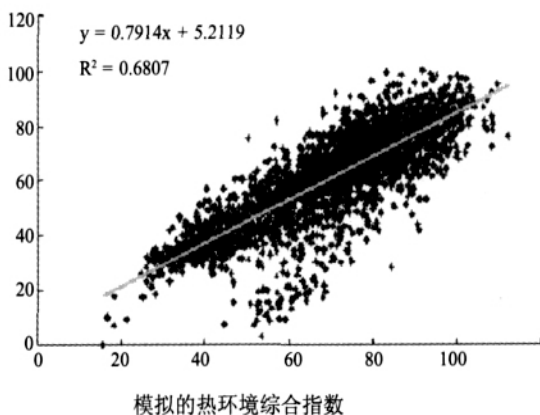


图 4 城市热环境实际值与模拟值的关系

Fig. 4 Relationship between actual values and simulated values of urban thermal environment

- [9] Wilson J S, Clay M, Martin E. Evaluating environmental influence of zoning in urban ecosystems with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 303-321.
- [10] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and nature heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99: 44-54.
- [11] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 375-386.
- [12] Zhang Hsiaofei, Wang Yanglin, Wu Jiansheng et al. Study on land surface temperature vegetation cover relationship in urban region: A case in Shenzhen City. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 369-379. [张小飞, 王仰麟, 吴健生等. 城市地域地表温度—植被覆盖定量关系分析: 以深圳为例. *地理研究*, 2006, 25(3): 369-379.]
- [13] Wu Jiawei, Xu Jianhua, Tan Wenqi. Study on the relationship of urban heat island and vegetation abundance in Shanghai City. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(1): 26-30. [武佳卫, 徐建华, 谈文琦. 上海城市热场与植被覆盖的关系研究. *遥感技术与应用*, 2007, 22(1): 26-30.]
- [14] Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77. [季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.]
- [15] Zhou Shuzhen, Su Jiong. *Urban Climatology*. Beijing: China Meteorological Press, 1994. 244-345. [周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 244-345.]
- [16] Sang Jianguo, Zhang Zhiyi, Zhang Boyin. Dynamical analyses on heat island circulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(3): 321-327. [桑建国, 张治坤, 张伯寅. 热岛环流的动力学分析. *气象学报*, 2000, 58(3): 321-327.]
- [17] Chen Shenbin, Pan Liqing. Effects of urbanization on the annual mean temperature of Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(1): 27-36. [陈沈斌, 潘莉卿. 城市化对北京平均气温的影响. *地理学报*, 1997, 52(1): 27-36.]
- [18] Zhou Jianhua, Sun Tianzong. *Urban Remote Sensing*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1995. 31-55. [周坚华, 孙天纵. 城市遥感. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995. 31-55.]
- [19] Markham B L, Barker J K. Spectral characterization of the LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(5): 697-716.
- [20] Weng Q H. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(10): 1999-2014.
- [21] Song Yongchang, You Wenhui, Wang Xiangrong. *Urban Ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2000. 317-320. [宋永昌, 由文辉, 王祥荣. 城市生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2000. 317-320.]
- [22] Weng Q H, Lu D S, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 467-483.
- [23] Wu C. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 493-505.
- [24] Li Xia, Yeh A G O. Application for spatial decision and urban simulation of principal component analysis and Cellular Automata. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(8): 683-690. [黎夏, 叶嘉安. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(8): 683-690.]
- [25] Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography* (2nd edn.). Beijing: Higher Education Press, 2002. 84-93. [徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 84-93.]
- [26] Gao Zhiqiang, Liu Jiyan, Zhuang Dafang. The relations analysis between ecological environmental quality of Chinese land resources and population. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(1): 66-70. [高志强, 刘纪远, 庄大方. 基于遥感和 GIS 的中国土地资源生态环境质量同人口分布的关系研究. *遥感学报*, 1999, 3(1): 66-70.]
- [27] Zhang Xiuying, Zhao Chuanyan. Study on a potential eco-environment evaluation based on GIS in Longzhong Loess Plateau. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2003, 39(3): 73-76. [张秀英, 赵传燕. 基于 GIS 的陇中黄土高原潜在生态环境评价研究. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2003, 39(3): 73-76.]
- [28] Xu Jianhua, Yue Wenzhe, Tan Wenqi. A statistical study on spatial scaling effects of urban landscape pattern: A case study of the central area of the external circle highway in Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 1058-1067. [徐建华, 岳文泽, 谈文琦. 城市景观格局尺度效应的空间统计规律: 以上海中心城区为例. *地理学报*, 2004, 59(6): 1058-1067.]

Impact of Human Activities on Urban Thermal Environment in Shanghai

YUE Wenze¹, XU Jianhua²

(1. Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

2. The Key Lab of GIScience of the Ministry of Education, Dept. of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The urban thermal environment effect resulted from urban heat island phenomena becomes prominent with the rapid urban expansion, which had adverse effect on the urban environment and the urban sustainable development. Spatial-temporal change of urban thermal environment is relevant to interactions of human activities such as the change of underlying surface, anthropogenic heat emission and environmental pollution. Due to the complexity of factors contributing to urban thermal environment, the routine observing methods and statistical methods are insufficient in acquiring data and analyzing the responses of human activities to thermal environment, especially discerning the major attributors from the others. Fortunately, the remote sensing and GIS can resolve the technical problem effectively, which can quantitatively explore the relationship of spatial-temporal change of thermal environment with human activities. Based on Landsat ETM+ images and taking the urban area inside the ring road of Shanghai as a case study, this paper employed Spatial Principal Component Analysis (PCA) method to analyze the spatial pattern and the influencing factors of urban thermal environment as a substitute of Multi-Criterion Evaluation (MCE) method. The results showed that urban construction density and population density, allocation of industries, types of underlying surface and diversity of urban landscape were the leading factors contributing to the urban thermal environment in the metropolitan area of Shanghai. The linear model including the four independent variables could reveal the response mechanism of human activities on thermal environment in Shanghai. From the model, urban building density and population aggregation were regarded as the most sensitive factors to thermal environment among these factors. Furthermore, the difference in spatial distributions of the main factors formation of the diverse urban thermal environment in different areas. The results would be of value to simulate spatial change of urban thermal environment and even put forward countermeasures to lessen the urban thermal environment intensity for policy makers.

Key words: urban thermal environment; factors; Principal Component Analysis; Shanghai