

20 世纪 90 年代上海市热环境变化及其 社会经济驱动力

岳文泽^{1,2}, 徐丽华^{1,3}, 徐建华⁴

(1. 浙江大学土地管理系, 浙江 杭州 310029; 2. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室 上海 200062;
3. 浙江林学院, 浙江 临安 311300; 4. 华东师范大学地理系 上海 200062)

摘要: 城市化过程导致地表水分蒸腾减少、径流加速、显热的存储和传输增加以及水质降低等一系列生态环境效应, 其中最典型的特征就是城市热岛的出现。城市热环境动态主要驱动力可以概括为两大方面: 地表覆被的变化与人类社会经济活动。论文采用 Landsat 的 TM/ETM+ 为基本数据源, 先定量反演了每个像元内的陆地表面温度, 以此探讨了 20 世纪 90 年代上海市主城区热环境的动态演化和社会经济驱动力。研究结果揭示, 20 世纪 90 年代上海市主城区热岛范围显著扩大, 但中心城区的热岛强度在下降, 空间格局也趋于复杂; 通过分析, 城市热环境空间格局动态演变是不同尺度上、相互嵌套、相互影响的多种驱动力的综合作用结果。其中, 城市建成区的快速扩展是热岛范围不断扩展的最显性驱动力; 中心城区人口密度显著下降是热岛中心强度降低的一个综合性驱动因子, 而以重化工业为代表的能耗布局改变则是中心城区热岛强度降低的一个主要驱动力; 通过增加绿化面积布局等人为措施改变热辐射和存储模式, 对缓解城市热环境来说是最有意义的因素。由于多种驱动力相互嵌套、交互作用, 因此建立城市热环境演变驱动机制的定量模型还十分困难, 但是研究结果对于制定城市热环境改善政策和编制合理的城市规划等都具有一定的借鉴意义。

关键词: 陆地表面温度; 动态演变; 驱动力; 遥感

Thermal environment change and its socioeconomic drivers in Shanghai City during the 1990s

YUE Wenzhe^{1,2}, XU Lihua^{1,3}, XU Jianhua⁴

1 Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China

2 Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration of Shanghai City, Shanghai 200062, China

3 Zhejiang Forest University, LinAn, Zhejiang 311300, China

4 Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062

Abstract: The urbanization process has significant environmental implications including reduction in evapotranspiration, promotion of more rapid surface runoff, increased storage and transfer of sensible heat, and reduction of air and water quality. The thermal environment is an important factor for the urban eco-environment. There are two main aspects of drivers for urban thermal environment dynamic, land cover change and human socioeconomic activities. This paper first retrieves the urban land surface temperature of Shanghai city using Landsat imagery data (TM/ETM+) on a pixel-by-pixel basis, then discusses the urban thermal environment dynamic and its drivers in Shanghai city during the 1990s. The results reveal the characters of the urban heat island effect. The extent of the heat island expands distinctly and the thermal environment worsens, however, the strength of heat island in the center of the urban area decreases and its spatial pattern becomes more complex. There are many different scales of socioeconomic drivers and synthesis interactions for the thermal environment dynamic. The rapid sprawling of the urban built-up area is the apparent driver of the expanding heat island. To

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40701177); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金资助项目; 中国博士后基金资助项目

收稿日期: 2008-09-24; 修订日期: 2009-02-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuewenze@163.com

improve the thermal environment in the urban center, decreasing population density is a synthesis driver, but the change of energy consumption patterns represented by industry is the key driver. Man-made countermeasures are the most effective means to change the pattern of thermal radiation and storage by increasing green vegetation cover and decreasing impervious surfaces.

Key Words: land surface temperature; dynamic; driver; remote sensing

近 30a 来,中国社会经济高速发展及快速城市化进程所产生的一系列生态环境问题,已经引起越来越广泛的关注^[1-2]。在所有快速城市化的生态环境效应中,以城市热岛现象为代表的城市热环境也逐步演化为城市环境问题的一个重要领域。热环境,它受到地表的物理性质和人类社会经济活动的共同影响,是城市生态环境状况的综合概括与体现^[3]。因此,如何定量研究城市热环境演变规律及其与多要素的内在关系,并有效控制和缓解城市热岛效应已成为当前城市热环境研究的热点问题。

传统城市热环境研究主要利用有限的地面气象站提供的地温观测资料,通过城乡气温的历史对比分析来研究城市热岛效应^[4-6]。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。热岛效应获取的另外一个重要途径是结合气象观测同化数据以及下垫面特征及人为热源的空间分布,利用中尺度气象模式进行数值模拟,研究城市热岛变化和局地热岛环流。例如陈燕等、何晓凤等,江学顶和夏北成等分别采用中尺度气象模式 MM5,进行数值模拟分析了杭州、南京和广州的热岛效应^[7-9]。通过与遥感手段和实测数据的对比,发现数值模拟技术最高的分辨率也可以达到 500m,由于可以考虑地面热源的信息,模拟结果的精度要高于遥感反演的结果。而且不受到时相的限制,甚至可以模拟夜间的热岛。但是对于研究城市内部的热环境变化来说,500m 的空间分辨率还是过于粗糙。而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的主要手段^[10]。自 1972 年 Rao 第一个提出利用卫星热红外遥感数据分析城市热岛效应以来^[11],已经开展了一系列基于热红外遥感数据的城市热岛效应研究。从早期用 AVHRR 数据进行区域尺度的城市温度制图研究,到近些年来较高空间分辨率的 Landsat TM(热红外波段 120m)和 ETM+(热红外波段 60m)数据被广泛用于局地尺度的城市热环境研究^[12-15]。目前,国内外对城市热环境的研究主要集中在城市热岛形态结构、过程演变^[16-17]等方面,现有关关注城市热岛驱动力的研究主要是基于城市下垫面单一或多种土地利用/覆被类型与热岛温度之间的相关分析。例如,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^[18]。Chen 使用 Landsat 数据提取了 NDVI、NDBI 和 NDWI 3 种光谱指数,并分析了这 3 种指数与地表亮温之间的关系^[19]。Xian 分析了“不透水地表面(ISA)”与地表辐射温度强度与空间分布的关系,并认为 ISA 对城市热环境有明显影响^[15]。Lo、Weng 与 Wilson 等分别采用线性回归方法,揭示热岛温度与土地利用/覆被类型关系^[20-22]。也有通过对热岛温度与城市环境、人口以及社会经济因素空间分布的相关分析,来揭示人类活动直接对城市热岛的驱动。例如,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^[23]。以上分析可见,由于地表覆被差异而引起地表温度变化可以通过定量的物理模型解释,因此现有的驱动力研究基本关注这个领域。而城市作为自然与社会经济的复合系统,其内部大规模的地表覆被变化现象并不是主要的,而主要是与人类生活、生产密切相关的社会经济活动变化。就城市热岛动态演变格局形成的人口与社会经济多要素驱动机制来看,国内外相关研究还不多见。

本文选择我国最大城市之一的上海市主城区为研究对象,以中等尺度分辨率遥感影像 TM/ETM+ 为数据源,通过定量方法探讨 20 世纪 90 年代,上海城市热岛的动态演变,同时选择城市空间扩展、人口密度、工业布局、城市绿化等作为驱动因素,对可能影响城市热岛演变的社会经济驱动力进行了初步分析,为确定城市热岛的驱动因子和建立更为科学的、确定性热岛机制模型提供一定借鉴。

1 城市热环境遥感方法

1.1 温度反演公式

地表温度是地表能量交换的核心信息,它直接影响着大气、海洋、陆地之间的显热和潜热交换。地表温度是环境温度的主体,是城市热岛的基本体现,本文利用地表温度代表城市热环境强度。为计算地表温度,首先将预处理后的 TM/ETM+ 热红外波段影像的 DN 值转化为行星反射值,公式为:

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

式中, L_λ 为传感器获取的辐射值, $gain$ 为卫星的增益系数, $offset$ 为偏移系数,这两个系数可以在原始影像的头文件中获取^[24]。选择变化前的影像为 1989 年 8 月 11 日 Landsat5 的 TM,其 $gain$ 为 0.1238, $offset$ 为 0.0055;变化后的影像为 2001 年 7 月 3 日 Landsat7 的 ETM+,采用 Band6_1 热红外波段,其 $gain$ 为 0.0668, $offset$ 为 0。

通过下式将 L_λ 转化为辐射亮温:

$$T_B = K_2 / (\ln(K_1 / L_\lambda + 1)) \quad (2)$$

这里 T_B 为辐射亮温(K), K_1 、 K_2 为标定常数,一般取 $K_1 = 666.09$, $K_2 = 1282.71$, L_λ 为公式(1)得到的辐射值^[24]。

辐射亮温是假定地球为黑体的条件下求得的,不能很好的反映地面不同覆盖状况的差异,可以进一步利用不同地物的比辐射率(ε)将辐射亮温反演为陆地表面温度,公式如下:

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda \times T_B / \rho) \ln \varepsilon} \quad (3)$$

式中, λ 为发射辐射的波长,一般取热红外波段的平均值 $\lambda = 11.5$; $\rho = h \times c / \sigma (1.438 \times 10^{-2} \text{ mK})$, σ 为 Boltzmann 常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), h 为 Planck 常数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$), c 为光速 ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)^[24]。

1.2 比辐射率的测定

由于城市下垫面非常复杂,中等分辨率像元大多数为混合像元,比辐射率 ε 难以确定。根据 Weng 等人研究, ε 与植被覆盖情况具有很好的响应关系^[25]。Van 通过实地测量一系列自然地表的热红外(8—14 μm)比辐射率和 NDVI 后发现,经过对数转换以后,它们之间具有良好的相关性,相关系数为 0.94,提出如下公式^[26]:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (4)$$

但 Van 的公式是在自然地表上总结出来的,要求 NDVI 的值介于 0.157—0.727 之间,对于城市而言,城市水泥、沥青路面或屋顶等很多小于 0.157 的像元,据宫阿都等人的研究,将 NDVI 值小于 0.157 的像元,分为水体、建筑表面与裸地,其中裸地和建筑表面比辐射率定为 0.923^[27]。而水体,根据相关研究将其比辐射率定为 0.9925^[28],在本文的处理中,水体使用土地利用调查分类数据,通过计算得到的 NDVI 结果,将大于 0.157 的像元都按照公式(4)处理,小于 0.157 的借鉴上述方法,计算得到了地面温度。

2 结果分析

2.1 不同时相地表温度的计算结果

分别选择夏季 1989 年 8 月 11 日的 TM 影像和 2001 年 7 月 3 日的 ETM+ 影像,按照上述方法,得到上海市主城区的地表温度分布图。

从图 1 可以看出,1989 年 8 月份上海城市热岛主要集中在黄浦江以西、内环以内以及北部的吴淞口附近两个区域。因为在 20 世纪 80 年代,上海市浦东新区还没有开发,上海市城市布局高度集中在浦西黄浦江以及苏州河沿岸(现在浦西的内环线内),而且受到工、商业城市性质的影响和城市功能分区不合理的制约,居住、工业、商业等功能区布局高度密集且相互交错,导致城市热岛特征非常显著,并高度集中在中心区域。但是在浦东的黄浦江沿岸地区温度也比较高,例如陆家嘴地区、南部的上钢新村地区等,因为当时在沿黄浦江东岸地区布局了一些高能耗的工业,主要造船和钢铁制造。

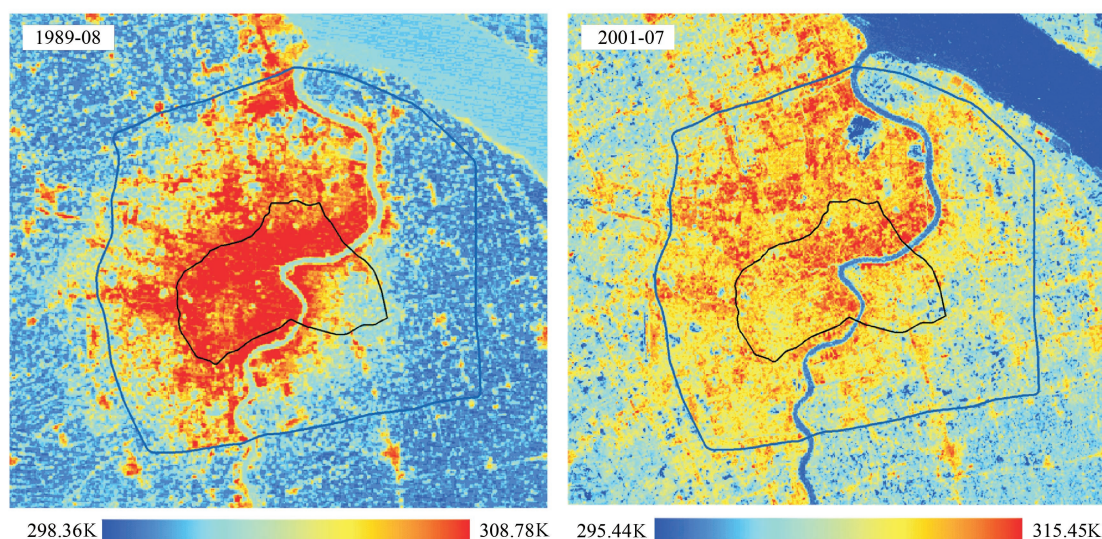


图1 不同时期城市地表温度

Fig. 1 The map of urban land surface temperature in different time

从图1中还可以看出,2001年城市热岛范围相对1989年有很大扩展,其中北部已经和吴淞口高温区连成一片,西部和西南部已经扩展到外环线附近,浦东地区也从黄浦江沿岸向外迅速拓展。因为到2001年,浦东新区开发近10a,城市规模迅速拓展到现在的内环以外,在浦西地区则部分拓展到外环线附近。在图1中,可以看到浦东地区在整个外环以内呈不连续的片状分布,例如张江地区、金桥地区和外高桥地区3个高温组团。

2.2 20世纪90年代城市热岛的时空对比

由于热岛效应的存在,城乡温度差异强烈。而由城市和农村下垫面差异而导致的地表温度差更为显著,最高可达到 10°C 以上,这远远高于城乡之间的气温差异。为了突出城市热岛的对比,在郊区选取不同的样区,然后计算出郊区的平均温度,作为背景温度。图2是随机选择的作为郊区背景温度的样本分布。除了东北部地区个别样本分布在外环线内以外,其他的都分布在外环线以外非建成区。用这些样本分别提取对应区域1989年后2001年度地表温度,并计算平均值,1989年所有样本平均得到的背景温度为 299.8497K ;2001年则为 299.8756K ,可见两个年份郊区的平均地表温度基本一致。

分别用两个年份的地表温度减去背景温度得到城市热岛的强度和范围,结果如图3。

图3显示,1989年上海市的热岛主要集中在内环线内的浦西地区、浦东的黄浦江沿岸区域以及北部的吴淞口地区,特别是浦西地区,除了长宁和徐汇交界处外,大部分都在 9°C 左右。对比2001年虽然热岛范围有较大的增加,在北部、西部和西南部都扩展到外环以外了,浦东热岛范围也有较大扩展,扩展主要有两种方式,一是沿着交通线呈“楔形”从城区向外扩展,二是在一些新开发的工业区呈片状扩展。为了清楚揭示变化情况,用2001年城市热岛温度减去1989年热岛温度,结果如图4所示。

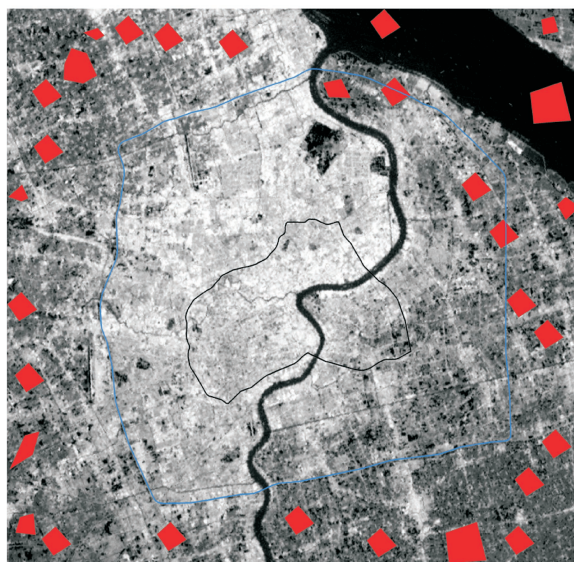


图2 背景温度样本分布

Fig. 2 The distribution of background temperature samples

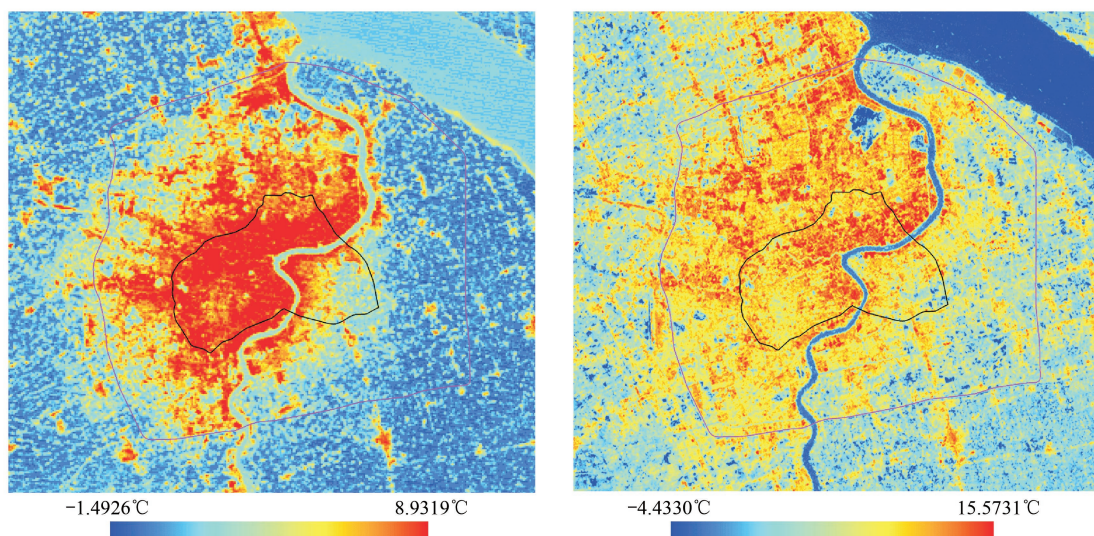


图3 1989、2001 年夏季热岛的对比

Fig. 3 The comparison of summer urban heat island between 1989 and 2001

从图 4 可见,城市中心的热岛强度下降明显,特别是内环以内的老城区,沿着浦西内环线的内侧以及浦东陆家嘴地区是温度下降幅度最大的地区,此外还有一个特别明显的地区是北部的新江湾城地区,该区 1989 年时为机场用地,2001 年则废弃后成为大型的城市湿地。而在 1989 年建成区的外围到 2001 年城市新增建成区,温度则有一定的上升,在外环线内,主要表现为浦东地区,从 1992 年开始大规模开发浦东,随着城市的扩展城市热岛的范围和强度都随之增大;而在外环线的外侧,强度增大是一种普遍的趋势,一方面说明热岛范围在扩展,另外也说明城市热岛对郊区的影响逐渐加强。

为定量的表示城市热环境变化,使用内外环线分别对 2001、1989 年温度差值进行了统计,结果显示,在内环线内部,2001 年比 1989 年地表温度平均降低了 2.4432℃;内外环线之间区域,温度平均值基本保持不变,略微降低了 0.5409℃;而在外环线以外的区域(除长江水面)2001 年比 1989 年平均升高了 0.2521℃。

从以上分析可以看出,10 多年来上海城市热岛的演变具有以下特征,一是范围有了很大的扩展;二是热岛中心的强度有了明显下降;三是热岛效应对郊区的影响在逐渐增强。平均地表温度的空间格局特征趋于复杂。

2.3 20 世纪 90 年代热环境变化驱动力的初步探讨

由于自然地表覆被差异而引起的地表温度变化可以通过定量的物理模型解释。但是人类社会经济活动的高度集中而对热环境影响的变化则具有很高随机性和复杂性。人类社会经济活动对城市热环境的影响主要可归结为如下两方面:一是促进城市热环境强度增加的因素被加强。主要是城市空间扩展;城市人口稠密变迁;工业化生产过程中消耗大量能源产生人为热。二是有利于减少城市热环境强度的因素被削弱。例如城市中水体、植被减少导致的蒸发量与蒸腾量减少^[29]等。因此,排除自然的地表覆被变化原因以外,本文试图

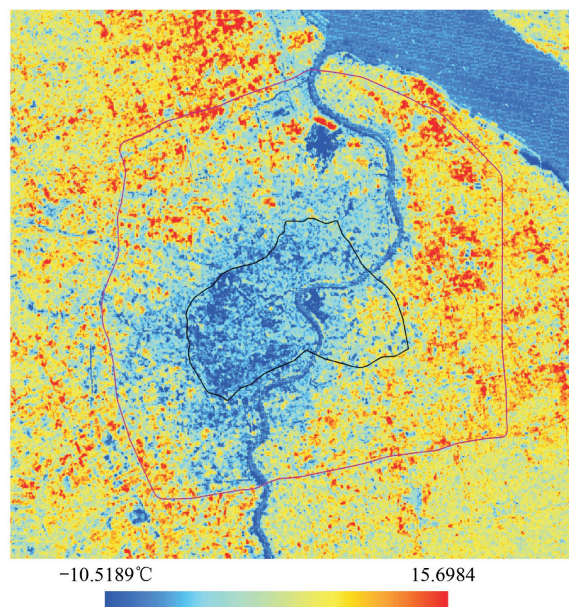


图4 2001 年与 1989 年城市热岛的温度差异

Fig. 4 The temperature variance of urban heat island between 1989 and 2001

通过对城市内部人类社会经济活动各因素空间分布的动态演变分析,揭示其与热环境的关系。

2.3.1 城市空间扩展

城市热岛扩展与城市空间扩展是密切相关的。图 5 是利用上海市土地利用变更调查数据提取的 1988 和 2002 年建成区边界,反映了 10 多年来上海市城市扩展迅速。对照图 3,发现城市扩展与城市热岛扩展在空间形态上基本一致。从数量上看,建成区从 1988 年的 240.59 km^2 扩展到 2002 年的 710.84 km^2 ,从原来的内环线扩展到外环线以外,加上宝钢的区域,2002 年建成区面积是 1988 年的 2 倍左右。可见由于城市规模不断增加,导致 10a 来城市热岛的范围也不断增加。进一步对外环线内建成区面积扩展与热岛增强范围进行分析,1988 到 2002 年外环线内建成区面积从 240.59 km^2 增加到 542.25 km^2 ,增加了 301.66 km^2 ,而外环线内城市外围热岛强度增加的像元为 63002 个,面积达到 226.81 km^2 。由于建成区边界数据周期多了 2a,因此结果基本吻合。从形态和数量两个方面都说明随着城市扩展,城市热岛范围随着扩大。因此,可以说城市扩展是城市热岛变化的最显性驱动力。

2.3.2 中心城区人口密度的变迁

在城市内部,除了绿地和水面外,都是很少变化的建筑景观,热辐射改变不是影响热环境动态的根本原因。对于 20 世纪 90 年代中心城区热岛强度明显下降的现象,人为热排放减少是可以明确的原因。图 6 是上海市中心区 20 世纪 90 年代人口密度的变迁。从图中可以看出,中心城区人口密度下降非常显著。对比 1990 年,在内环线以内,除了东部靠近浦东内环线的人口密度有所增加外,其余的人口密度都是降低的,尤其是浦西地区。人口密度每平方公里在 7.4 万人以上的街道从 9 个降低到 1 个;在每平方公里 5 万人到 7.4 万人之间的街道从 14 个减少到 11 个。而对比热岛变化数据,从 1989 年到 2001 年内环线内平均降低了 2.4432°C 。

自 1990 年以来,随着浦东开放、开发,以及旧城改造、土地置换力度的加大,上海成为国内城市扩展与格局变化最剧烈的城市之一,人口空间重构现象十分频繁。20 世纪 90 年代以来,由于土地批租、市政建设和老城区改造的大规模进行,再加上产业结构调整,促使中心城区核心部分居民大规模向外搬迁,整个 90 年代市中心区人口密度下降约 40%^[30]。除了政策导向外,10a 间大规模市政建设,是导致中心城区人口密度降低的另一要素。如内环高架浦西段长 29.2km,南北高架长 8.45km,延安路高架西段 6.2km,地铁一号线 16.1km,南浦、杨浦、卢浦大桥和大片旧城改造等等,全部在人口超高密度的闹市中心。连续多年的外迁,使闹市中心人口出现了大规模范围内的净减少^[31]。中心城区人口密度降低情况与热岛效应缓和状况空间上高度一致,说明在城市内部,代表人类活动及其集聚状态的综合性指标人口密度是影响热环境动态的综合驱动力。

2.3.3 中心城区能耗布局的动态变化

20 世纪 80 年代中期以来,为了缓解上海中心城区高度拥挤、环境污染状况,历届政府一直强调工业,特别是污染工业、重型工业等高能耗企业外迁的政策。图 7 分别是 1988 年和 2000 年浦西内环线内主要能耗的分布。从 1988 年来看,当时中心城区有大量高能耗工业用地分布,例如杨浦区靠近黄浦江的区域,普陀区苏州河的沿岸、长宁南部、卢湾和徐汇靠近内环线的区域等有几个明显的集聚区。而到了 2000 年中心城区工业用地显著下降,而且在空间上基本是零散分布,空间格局相对趋于复杂。

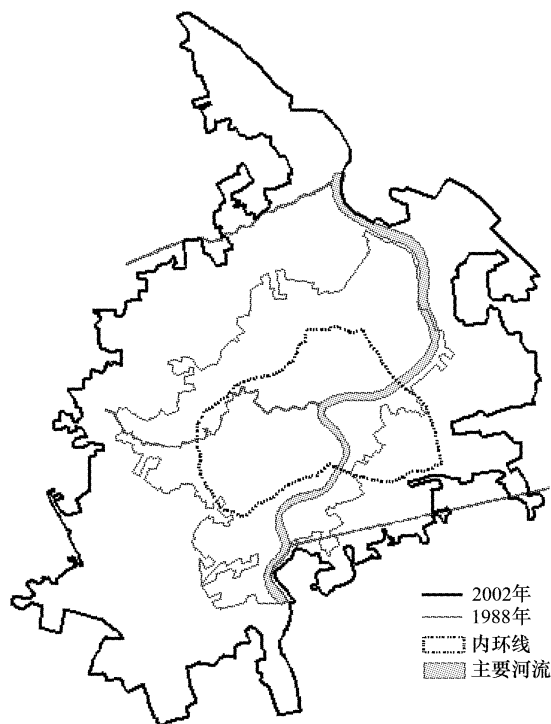


图 5 1988—2002 年之间城市建成区面积扩展

Fig.5 Sprawling of urban built-up area from 1988 to 2002

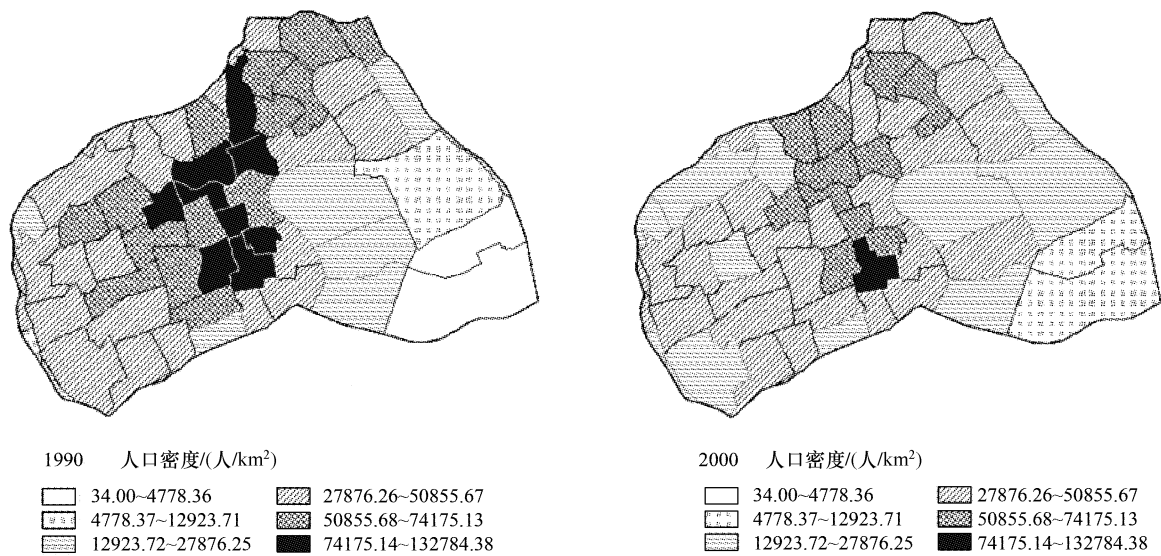


图 6 1990—2000 年之间中心城区人口密度变化

Fig. 6 The variation of population density in centre urban area from 1990 to 2000

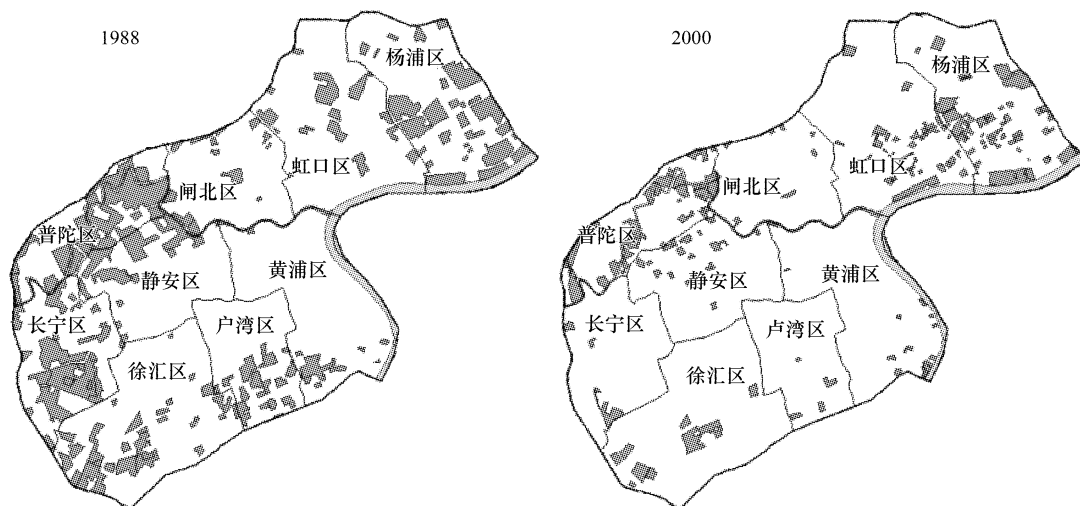


图 7 1988—2000 年之间中心城区能耗布局变化

Fig. 7 The change of energy consuming pattern in centre urban area from 1988 to 2000

统计发现,1988 年浦西内环线以内高能耗工业用地面积 14.37km^2 ,占浦西内环线内总面积的 17.76%; 2000 年浦西内环线以内工业用地面积 5.68km^2 ,比重下降到 7.01%,近 10a 的时间降低了 10.7 百分点。同样,对相同区域热岛温度变化进行统计,结果揭示,在浦西的内环线内,从 1989 年到 2001 年内环线内平均降低了 2.8181°C ,是整个热岛区内强度降低最为显著的区域。另外,由于能耗分布的空间格局从原来的组团式趋于更加复杂,导致温度变化格局趋于复杂。尽管这里有人口密度降低的作用,但是能耗布局的减少对中心热环境改善具有重要贡献。

2.3.4 中心城区绿化工作的加强

植被热辐射能力明显小于建筑表面,而且热容量相对较大,潜热存储能力大于感热。因此绿化无疑对改善城市热环境具有积极作用。为改善城市环境,上海市一直强调中心城区街道和居住区内公共绿地及公园绿地的改造和建设,并大力推进屋顶绿化工程。20 世纪 90 年代以来,城市绿化工作取得了长足的进步,据统

计,2000 年覆盖率已经超过 30%。

图 8 分别是 1989 年和 2000 年上海市浦西内环线内的植被指数分布图,植被指数是植被质量和空间分布的有效表征工具。可以发现,20 世纪 90 年代上海市中心城区绿化成绩显著,对中心城区热环境的改善贡献明显。可以说通过人工绿化手段,恢复透水表面是城市环境动态的积极驱动因素。

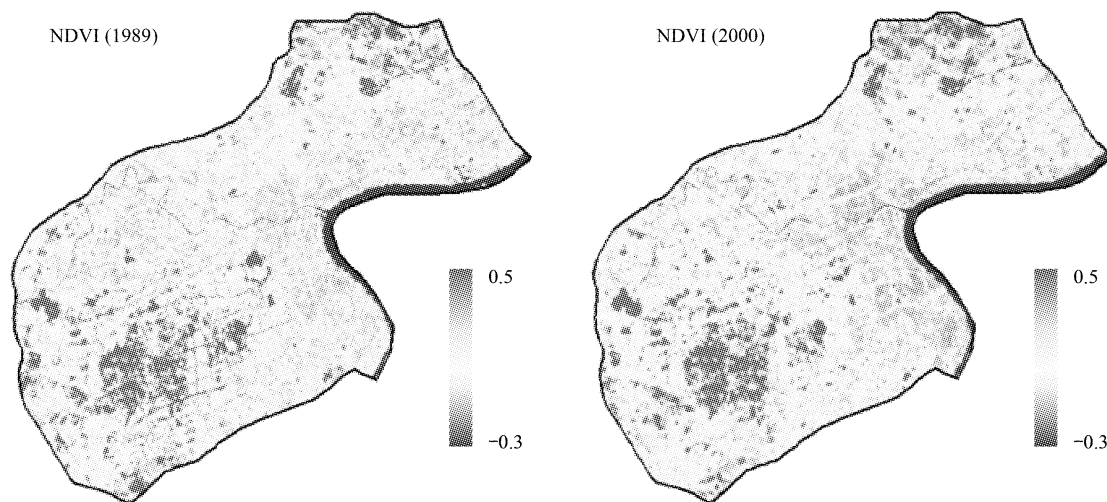


图 8 1989—2000 年之间中心城区植被变化

Fig. 8 The change of vegetation in centre urban area from 1989 to 2000

3 讨论与结论

通过对上海市主城区 20 世纪 90 年代城市热岛的动态演变和其与人类活动密切相关的社会经济驱动力的分析得到结论如下:城市热岛的形态和强度在空间上都具有明显变化,不同区域的变化差异很大,因此决定不同空间上驱动因素对热环境的作用不同。因此,可以从可能影响城市热环境动态演变的空间要素选择社会经济驱动因子。对社会经济驱动因子进行初步分析发现,城市建成区的空间扩展面积与热岛强度增加面积基本吻合,城市建成区的空间快速扩展是热岛范围不断增加的最显性驱动力;由于人类社会经济活动对城市热环境影响具有高度综合性与复杂性,因此,对于上海市城市中心的热岛强度降低,或者热环境改善来说,中心城区人口密度显著下降是一个综合性的驱动因子;而以重化工业生产为代表的能耗布局,由于直接向环境排放大量热量,所以对城市热岛强度的影响是最直接或最显著的,对应区域的热岛强度降低也是所有区域中最为显著的;通过加强城市绿化工作、人工减少不透水面布局等人为措施,对环境城市热环境来说可能是最有意义的驱动力。

通过定量的城市地表温度的动态,清楚揭示了上海市在 20 世纪 90 年代城市热岛以及城市热环境的演变特征与规律,这对认识城市环境演变规律与治理具有重要意义。城市热环境的社会经济驱动力及其作用机制问题,本身是一个非常复杂的问题,主要是多因素相互嵌套与相互影响,例如人口密度就是一个高度综合指标,即反映了人类生活活动也反映了一定人类生产活动。目前的研究一般集中于单要素的相关分析,这种分析范式对某一要素分析的同时是基于其他要素没有对该要素影响的假设前提,因此可能造成夸大单一要素的作用。本文通过不同社会经济要素在不同空间上分布量的动态变化并与之对应空间热岛强度动态变化的对比,来揭示不同要素对热环境动态的作用与影响方式。其优点是能够合理揭示普遍的作用规律;但缺点是相互作用的过程与强度还不能定量描述。

因此,由于涉及城市环境演变的社会经济驱动力因素众多,而且相互影响、相互嵌套,作用机制十分复杂,建立城市热环境综合的、确定性的定量社会经济驱动机制模型目前还是十分困难,但是考虑到现有的可以量化的社会经济驱动因素,从统计学角度建立城市热环境形成机制的统计模型还是可能的。

References:

- [1] Zhou S Z, Zhang C. On the Shanghai urban heat island effect. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(4): 372-381.
- [2] Chen Y H, Shi P J, Li X B. Research on Spatial thermal environment in Shanghai City based on remote sensing and GIS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 139-144.
- [3] Yue W Z, Xu J H, Xu L H. An analysis on eco-environmental effect of urban land use based on remote sensing images. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 26(5): 1450-1460.
- [4] Zhou S Z, Su J. *Urban climatology*. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 244-345.
- [5] Sang J G, Zhang Z K, Zhang B Y. Dynamical analyses on heat island circulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(3): 321-327.
- [6] Chen S B, Pian L Q. Effects of Urbanization on the Annual Mean Temperature of Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(1): 27-36.
- [7] Chen Y, Jiang W M, Wu J, Gu J Q, Xu J Y. A numerical simulation on Hangzhou city heat island using regional boundary model. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 519-528.
- [8] He X F, Jiang W M, Chen Y, Liu G. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(1): 74-82.
- [9] Jiang X D, Xia B C. Spatial characteristics and dynamic simulations of urban heat environment of cities in Pearl River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1461-1470.
- [10] Zhou J H, Sun T Z. *Urban remote sensing*. Shanghai: Shanghai Scientific Technological Literature Press, 1995: 31-55.
- [11] Rao P K. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53: 647-648.
- [12] Gallo K P, Owen T W. Assessment of urban heat island: A multisensor perspective for the Dallas-Ft. Worth, USA region. *Geocarto International*, 1998, 13(4): 35-41.
- [13] Balling R C Jr, Brazel S W. High-resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(9): 1289-1293.
- [14] Weng Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(10), 1999-2014.
- [15] Xian G, Crane M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 147-156.
- [16] Carlson T, Perry E M, Shrugged T J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *A cultural and Forest Meteorology*, 1990, 52:45-69.
- [17] Xu H Q, Chen B Q. Remote sensing of the urban heat island and its change in Xiamen City of SE China. *Journal of Environment Sciences*, 2004, 169(2): 276-281.
- [18] Kim H H. Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(12): 2319-2336.
- [19] Chen X, Zhao H, Li P, Yin Z. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 133-146.
- [20] Lo C P, Quattrochi D A, Luvall 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Ji C P, Liu W D, Xuan C Y. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77.
- [24] Landsat Project Science Office. *Landsat 7 science data user's handbook*. Goddard Space Flight Center. 2002, www address: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html.
- [25] Weng Q H. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(5): 555-565.
- [26] Van De Griend A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for nature surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1119-1131.
- [27] Gong A D, Jiang Z X, Li J, Chen Y H, Hu H L. Urban land surface temperature retrieval based on landsat TM remote sensing images in Beijing.

Remote Sensing Information, 2005, (3): 18-20.

- [28] Masuda K, Takashima T, Takayama Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window region. *Remote Sensing of the Environment*, 1988, (24): 313-332.
- [29] Song Y C, You W H, Wang X R. *Urban ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2000: 317-320.
- [30] Gao X D, Wu W Y. Population redistribution and modeling of Shanghai city in the 1990s. *Acta Geographic Sinica*, 2005, 60(4): 637-644.
- [31] Wu L. Paying more Attention to the Population Redistribution during the Process of Urbanization: A Case of Shanghai. *Population & Economics*, 2001, (5): 39-43.

参考文献:

- [1] 周淑贞, 张超. 上海城市热岛效应. *地理学报*, 1982, 37(4): 372-381.
- [2] 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.
- [3] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于遥感影像的城市土地利用生态环境效应研究——以城市热环境和植被指数为例. *生态学报*, 2006, 26(5): 1450-1460.
- [4] 周淑贞, 束炯. *城市气候学*. 北京: 气象出版社, 1994. 244-345.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈燕, 蒋维楣, 吴润, 顾骏强, 徐集云. 利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究. *高原气象*, 2004, 23(4): 519-528.
- [8] 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 刘罡. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 74-82.
- [9] 江学顶, 夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态. *生态学报*, 2007, 27(4): 1461-1470.
- [10] 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.
- [23] 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.
- [27] 宫阿都, 江樟焰, 李京, 陈云浩, 胡华浪. 基于 Landsat TM 图像的北京城市地表温度遥感反演研究. *遥感信息*, 2005, (3): 18-20.
- [29] 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.
- [30] 高向东, 吴文钰. 20 世纪 90 年代上海市人口分布变动及模拟. *地理学报*, 2005, 60(4): 637-644.
- [31] 伍理. 重视城市化过程中的人口分布变化——以上海市为例. *人口与经济*, 2001, 5: 39-43.