

# 上海市城市化进程中热环境响应的空间评价

钱敏蕾,徐艺扬,李响,蔡芜斌,谢玉静,王祥荣\* (复旦大学环境科学与工程系,上海 200433)

**摘要:** 利用 Landsat TM/ETM+ 遥感数据解译与反演得到上海市 1997~2009 年的土地利用/覆盖类型图及热岛强度分布图,并分析其演变趋势,引入温度-植被指数(TVX)并采用 TVX 空间法定量研究了以建设用地扩张、生态用地减少为特点的城市化过程引起的热环境效应.研究表明,1997~2009 年,上海市人口呈现从中心城至郊区的流动趋势;热岛强度分布与城市化建设密切相关,呈现“葫芦串-葡萄串-摊大饼型”的蔓延模式;以牺牲生态用地为代价的建设用地扩张造成研究区域地表温度的上升及植被覆盖度的下降,其中林地减少所引起的热环境效应最大.研究可为城市规划决策过程中不同城市化空间的拓展情景提供其可能的环境响应结果,从而完善气候变化适应性对策,推进城市生态系统的可持续发展.

**关键词:** 土地利用/覆盖变化; 人口; 城市热岛; 温度植被指数; 气候变化; 上海市

**中图分类号:** X16      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2015)02-0624-10

**An assessment of spatial thermal environmental response to rapid urbanization of Shanghai.** QIAN Min-lei, XU Yi-yang, LI Xiang, CAI Yuan-bin, XIE Yu-jing, WANG Xiang-rong\* (Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China). *China Environmental Science*, 2015,35(2): 624-633

**Abstract:** The Landsat TM/ETM+ images, from 1997 to 2009, were used to analyze temporal changes of land use, land cover changes and urban heat island intensity. The relationship between temporal climatic variability and land use types was examined by an innovative construction of temperature vegetation index (TVX) space. Results show that Shanghai has undergone significant changes in land use and land cover over the study period. The land conversion, from forest land, farmland and water body to urban area, has led to the drastic increase of land surface temperature and the decline of fractional vegetation cover. The loss of forest land had the most serious climatic effect. Furthermore, the high-temperature region has expanded by different modes, from “Bottle Gourd Mode” to “Grape Bunch Mode” and to “Pancake mode” due to rapid urbanization and the population migration from city proper to rural areas. Our study could help urban planners and decision-makers to evaluate the environmental consequences of different land development scenarios, and identify portfolios of sustainable urban planning options for adapting to global environmental change.

**Key words:** land use and land cover change; population; urban heat island; temperature vegetation index; climate change; Shanghai

在城市化区域的人类活动过程中,人为主导的土地利用/覆盖更替影响着城市生态系统的结构和功能<sup>[1-2]</sup>,并对局部气候产生着重大影响<sup>[3-4]</sup>.因此,对城市下垫面变化情况的正确评估也在城市规划过程中起着至关重要的作用<sup>[5]</sup>.土地格局的动态演变导致的环境变化结果之一便是热岛的产生<sup>[6]</sup>.由于热环境响应是土地利用/覆盖变化对城市生态环境影响的一个重要研究方面<sup>[7]</sup>,越来越多的学者投入到了对热岛现象的研究中,利用气象站气温监测资料以及使用不同分辨率的卫星遥感图像(如

ASTER 等)来获得不同时空尺度的热岛特征成为了城市热岛研究的主要技术手段<sup>[8-12]</sup>.

在全球气候变化的大背景下,人作为城市化过程的主要驱使者,将受到越来越多的关注.为更全面地分析快速城市化进程引发的土地利用变化及其热环境响应,需在社会、经济、自然三方面共同构成的城市复合生态系统中进行全面考量,以丰富对城市局部气候状况的了解,并为城市

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(13AZD075)

\* 责任作者, 教授, xrxwang@vip.sina.com

规划决策者提供科学的参考。

本文以快速城市化下的国际大都市上海为例,从时空尺度评估其在近十几年来的土地格局演变、人口迁移状况及热岛扩散模式.另外,不同于以往普遍采用的统计学方法,本文还引入了温度-植被指数,采用 TVX 空间法来定量化研究土地利用/覆盖变化所引起的热环境动态响应,系统分析了研究区的生态过程及其气候效应,为在城市化进程中适应气候变化寻求更好的对策。

### 1 资料与方法

#### 1.1 研究区域

本文研究区为上海市陆域范围,包括 17 个市辖区和 1 个县(图 1).自 20 世纪 90 年代以来,以浦东新区开发开放为标志,上海加快了城市化建设的步伐,随着总体规划的实施,新城、新市镇建设加速.为更好地分析上海城市化的拓展趋势,本文以上海市外环线 and 郊环线为界,将研究区切割为 3 个一级子区,分别为:中心区:外环线以内的区域,面积为 662.94km<sup>2</sup>;近郊区:外环线和郊环线之间的区域,面积为 2284.76km<sup>2</sup>;远郊区:郊环线以外的区域,面积为 3616.01km<sup>2</sup>。

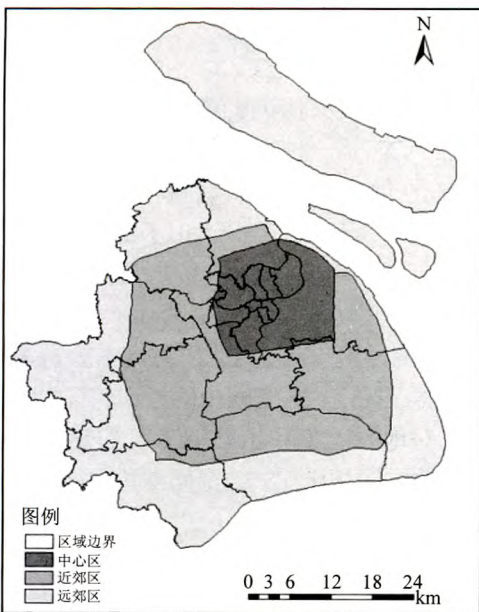


图 1 研究区域地理位置及范围

Fig.1 Location and scope of study area

经外环线和郊环线的切割,上海市所辖 18 个区县(以上海市域 2009 年前的区划为准)被割为 37 个小子区,定义其为二级子区。

#### 1.2 数据资料

本研究采用的数据资料主要包括遥感资料 and 人口统计资料. 遥感数据为经几何校正和重采样等预处理后的 6 幅上海地区 Landsat TM/ETM+ 影像图,其成像日期分别为 1997 年 4 月 11 日,1999 年 11 月 3 日,2001 年 7 月 3 日,2005 年 8 月 15 日,2008 年 3 月 24 日及 2009 年 4 月 28 日,影像质量较好,研究区 100%无云.本文以该数据来进行土地利用/覆盖的分类解译及地表温度的反演.人口统计资料为上海市 1997 年至 2009 年的各区县人口数据. 辅助数据包括相应研究年份的土地利用分类矢量图、上海市行政区划边界矢量图和相关统计资料等。

#### 1.3 研究方法

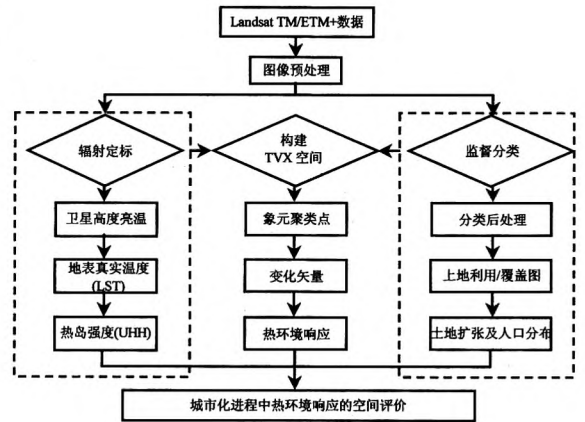


图 2 研究流程示意

Fig.2 Flow chart for analysis

1.3.1 土地利用/覆盖分类 为评估研究区域土地利用/覆盖演变情况,依据《土地利用现状分类标准(GB/T 21010-2007)》,结合上海市土地资源的实际经营特点、利用方式和覆被特征,将研究区的土地利用类型划分为:建设用地、林地、耕地、水域、裸地和滩涂共 6 大类.运用监督分类法,依次采用评价模板、确立初步分类结果、检验分类结果、分类后处理等步骤进行分类,而后根据对研究区域的划分方式生成不同类型的掩膜,对分类图像进行裁

剪,得到各级子区的土地利用分类图。

1.3.2 地温反演及热岛强度(UHI)分级 反演地表温度(LST)并计算热岛强度以总结研究区内区域热岛扩散模式.利用 Landsat TM/ETM+影像反演地表温度主要包括以下 3 个步骤:

1) 将热红外波段的灰度值 DN 值转化为光谱辐射值, TM 与 ETM+数据的参数反演公式:

TM 数据: $L_{\lambda}=0.0056332 \times DN + 0.1238$  [13] (1)

ETM+数据: $L_{\lambda}=0.0370588 \times DN + 3.2$  [14] (2)

式中: $L_{\lambda}$ 为传感器所接收到的辐射强度,  $mW/(cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

2) 将卫星观测的辐射强度值转化为亮温值:

$T_B = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_{\lambda} + 1)}$  [14] (3)

式中: $T_B$ 为未经过大气校正象元亮度温度,  $K_1$ 和  $K_2$ 为卫星发射前的预设常量,对 TM 数据,  $K_1=606.76mW/(cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ,  $K_2=1260.56K$ ;对 ETM+数据,  $K_1=666.09mW/(cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ,  $K_2=1282.71K$ 。

3) 根据地表真实情况对地表发射率进行修正,校正后的地表温度计算公式[15]为:

$S_t = \frac{T_B}{1 + \left( \lambda \times \frac{T_B}{\rho} \right) \ln \epsilon}$  (4)

式中: $\lambda$ 为发射光谱的波长,  $11.5\mu m$ ;  $\rho = hc/\sigma$ ,为  $1.438 \times 10^4 MK$ ;  $\sigma$ 为玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ;  $h$ 为普朗克常量,  $6.626 \times 10^{-34} Js$ ;  $c$ 为光速,  $2.998 \times 10^8 m/s$ ;  $\epsilon$ 为地表发射率,此处采用象元分解的方法,将研究区地表大体视为由自然表面、城镇和水面构成[16]。自然表面和城镇象元的发射率可分别根据以下两式进行估算:

$\epsilon_{surface} = F_r R_v \epsilon_v + (1 - F_r) R_s \epsilon_s + d\epsilon$  (5)

$\epsilon_{build-up} = F_r R_v \epsilon_v + (1 - F_r) R_m \epsilon_m + d\epsilon$  (6)

式中: $\epsilon_{surface}$ 和 $\epsilon_{build-up}$ 分别为自然和城镇象元的发射率; $F_r$ 为植被覆盖度; $R_v$ 、 $R_s$ 、 $R_m$ 分别为植被、裸土和建筑的温度比率,可由下列经验关系进行估算:

$R_v = 0.9332 + 0.0585 F_r$  (7)

$R_s = 0.9902 + 0.1068 F_r$  (8)

$R_m = 0.9886 + 0.1287 F_r$  (9)

式中: $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$ 和 $\epsilon_m$ 分别为植物、裸土和建筑在热波段的发射率,依据前人经验[16],分别取 $\epsilon_v=0.968$ ,

$\epsilon_s=0.97215$ ,  $\epsilon_m=0.970$ 。在地表相对较平整情况下,可取  $d\epsilon=0$ 。对于地表水面象元,采用典型的水体在热波段的辐射率赋值,即 $\epsilon_{water}=0.995$ 。由此可得各类型象元的发射率。

以上 3 个步骤可将象元灰度值转化为地表温度值,进而计算热岛强度分布。本研究共定义 2 种热岛强度,分别为: $\Delta T_1$ :中心城区与远郊区地表温度之差; $\Delta T_2$ :近郊区与远郊区地表温度之差。根据热岛强度值的范围,共划分为 5 个强度等级,分别为:一级: $\Delta T \leq 0^\circ C$ ;二级: $0^\circ C < \Delta T \leq 1^\circ C$ ;三级: $1^\circ C < \Delta T \leq 2^\circ C$ ;四级: $2^\circ C < \Delta T \leq 3^\circ C$ ;五级: $\Delta T > 3^\circ C$ ;

1.3.3 人口规模计算 为更好地分析城市化过程中,上海市中心区、近郊区及远郊区的人口分布及流动状况,需对 37 个二级子区的人口规模进行相应估算。由于统计年鉴中仅对上海各区县的年度人口密度进行了统计,假定居住人口皆分布在建设用地上,采用如下公式计算二级子区人口规模:

$Population\ Size = \rho \times (1+d)^n \times w_1/w_2$  (10)

式中: $Population\ Size$ 为二级子区人口规模,人; $\rho$ 为二级子区所在区县内统计年鉴给出的人口密度,人/ $km^2$ ;  $d$ 为人口密度月增长率,%;  $n$ 为遥感数据获取月份与年末人口统计月份数之差;  $w_1/w_2$ 为二级子区建设用地比例与该子区所在区县建设用地比例的比值。

1.3.4 温度植被指数(TVX)空间构建 采用 TVX 空间法评估土地利用/覆盖演替引起的城市热环境响应。TVX 是一种将象元地表温度与植被指数(VI)绘制在散点图中,以研究两者相互关系的多光谱方法[17-23]。Goward 等[24]给出了温度植被指数关系的潜在生物物理学意义,指出其关系是植被覆盖调节表面辐射温度的结果。Amiri[25]创新性地提出了将土地利用/覆盖类型作为基本分析单元,研究其聚类点在 TVX 空间中的运动轨迹,以追踪城市扩张对地表温度和植被覆盖度的影响。与传统的统计学方法相比,TVX 空间法可更直观地认识城市化进程中的生态变化所引起的环境效应。

本研究中 TVX 空间法实施的具体步骤为:以地表温度和植被指数分别作为横、纵坐标构建 TVX 空间。为减少不确定性,选择相隔年份时间较长、且遥感影像获取季节相同的 1997 年和



2009 年分别作为数据研究的起讫年,提取在此时间段内由林地、耕地、水域转化为建设用地的聚类点,取各土地利用类型聚类点的初始和终点平均值,绘制其在 TVX 空间中的运动轨迹.该轨迹路径的幅度可反映地表信息的改变所引起热环境效应的大小.

为使不同时相的数据具有较好的可比性,需对地表温度采用如下公式进行归一化处理:

$$T^* = \frac{T_s - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (11)$$

式中: $T^*$ 为归一化地表温度; $T_s$ 为象元地表温度; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别表示研究区中地表温度的最高与最低值.

本文所采用的植被指数为植被覆盖度,首先须对归一化植被指数(NDVI)进行正规化<sup>[26]</sup>,其公式为:

$$N^* = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_0) / (\text{NDVI}_s - \text{NDVI}_0) \quad (12)$$

式中: $N^*$ 为经正规化处理的象元 NDVI 值; $\text{NDVI}_s$ 和 $\text{NDVI}_0$ 分别为茂密植被覆盖和完全裸土象元的 NDVI 值,此处取影像中 NDVI 的最

大和最小值.

植被覆盖度( $F_v$ )的计算公式为:

$$F_v \approx N^{*2} \quad (13)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 土地扩张与人口分布的时空动态

图 3 为 1997 年到 2009 年期间上海市土地利用/覆盖类型的时空动态变化图,结合图 4 可以看出,研究区间内的建设用地面积比例显著提高,而林地、耕地、水域比例有不同幅度的减少.显然,建设用地的迅速扩张造成各类生态用地被蚕食.根据研究结果,从 1997 年到 2009 年,上海地区的建成区扩张主要发生在中心城边缘地区以及嘉定、松江和青浦等新城区域,原耕地和林地领域是新建设用地生成的主要贡献者,35.99%和 24.59%的新生成建设用地是由耕地和林地转化而来,其他土地利用类型转化为建设用地的贡献程度分别为:水域 3.71%、裸地 0.44%、滩涂 0.59%,大量生态用地被新建的商业区、居住区、工业区、交通走廊等建成区所占据.

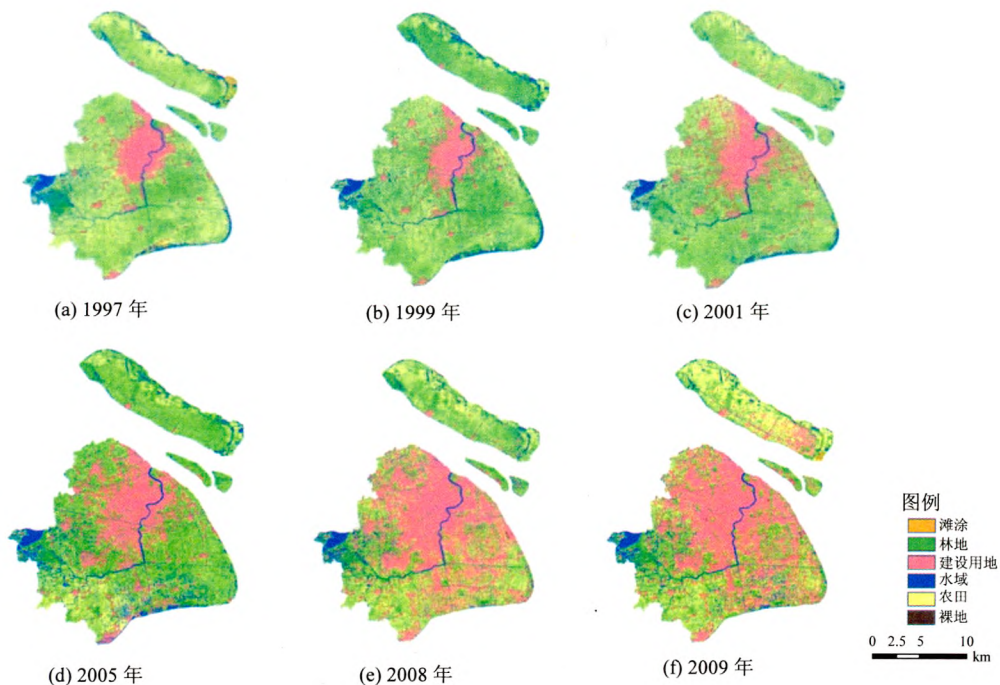


图 3 1997~2009 年土地利用/覆盖类型

Fig.3 Land use and land cover maps from 1997 to 2009

表 1 各子区人口规模及各土地利用/覆盖类型增长率(1997~2009)(%)

Table 1 Growth rates for population size and land use and land cover classes in each sub-zone for the period 1997~2009(%)

| 子区  | 类别   | 1997~1999 | 1999~2001 | 2001~2005 | 2005~2008 | 2008~2009 | 1997~2009 |
|-----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 中心区 | 人口规模 | -2.50     | 2.45      | -10.84    | -3.56     | -7.08     | -21.52    |
|     | 建设用地 | -4.39     | 6.85      | 1.01      | 6.54      | 0.46      | 10.47     |
|     | 林地   | 7.85      | -6.02     | -0.58     | -7.19     | 2.80      | -3.15     |
|     | 水域   | -0.27     | -0.54     | 1.92      | 0.58      | -1.83     | -0.14     |
|     | 耕地   | -3.93     | -0.91     | -1.79     | 0.95      | -2.05     | -7.73     |
| 近郊区 | 人口规模 | 2.58      | -1.69     | 11.03     | -0.14     | 4.29      | 16.06     |
|     | 建设用地 | 2.39      | 10.30     | 6.65      | 22.97     | 0.67      | 42.97     |
|     | 林地   | 7.88      | -5.59     | 1.66      | -19.89    | 3.39      | -12.56    |
|     | 水域   | -0.93     | 0.22      | 3.29      | -2.82     | 0.06      | -0.19     |
|     | 耕地   | -9.73     | -5.29     | -12.05    | 0.14      | -4.82     | -31.75    |
| 远郊区 | 人口规模 | -0.08     | -0.76     | -0.20     | 3.70      | 2.79      | 5.46      |
|     | 建设用地 | 0.89      | 8.79      | 2.93      | 14.82     | 2.57      | 24.14     |
|     | 林地   | 11.03     | -8.58     | 5.97      | -11.50    | -3.40     | -6.48     |
|     | 水域   | -0.85     | -1.74     | 4.93      | -3.71     | -0.47     | -1.85     |
|     | 耕地   | -9.18     | 1.69      | -8.33     | 0.37      | 0.93      | -14.52    |

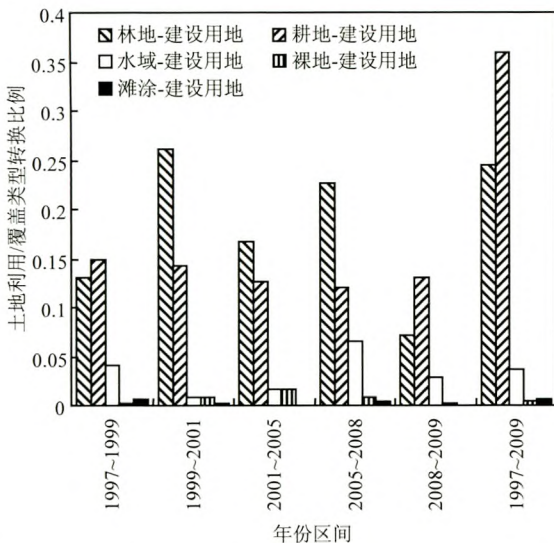


图 4 其他土地利用/覆盖类型转化为建设用地的比例 (1997~2009年)

Fig.4 Variation in rates of net conversion of other land use and land cover types to built-up land from 1997 to 2009

为更好地理解上海城镇化过程中的土地扩张与人口流动的时空动态特征,本文进一步研究了3个一级子区内建设用地、林地、耕地、水域面积以及人口规模的增长率(表1)。从表1中可看出,上海市中心城区人口规模在研究区间内(除1999年至2001年)持续下降,2001年后

下降最为迅猛,人口从1997年至2009年共减少了21.52%;近郊区和远郊区的人口在2001年以后基本保持增长趋势,尤其是近郊区,人口增长迅速,从1997年的279.27万人增长到2009年的922.10万人。从各时间段内的人口规模变化情况可以看出全市人口从中心城区向近郊、远郊区迁移扩散的趋势,这与中心城区近几年的功能置换和城市边缘地区住宅及工业用地的大规模建设密切相关<sup>[27]</sup>。

各子区间内的建设用地规模在研究时段内基本保持增长趋势,从1997至2009年的增长幅度大小依次为近郊区42.97%、远郊区24.14%、中心城区10.47%。林地、水域和耕地等生态用地规模在这3个子区内皆有不同程度的下降,其中,近郊区林地和耕地比例下降最大,位于城市边缘区和郊区的生态用地大多被城市建设的不透水表面所代替。

## 2.2 热岛分布特征及扩散模式

1997至2009年研究区域热岛强度的分布状况见图5。经与研究区域内气象站相应时段内地表温度测量值对比,测量点所在二级子区的平均地表反演温度值与实测地表温度的误差不超过1.5℃。结合土地利用/覆盖类型图可看出,热岛强度较强的区域通常具有较高的建设用地比例,如中心城区、城区边缘及新城区域;而林地、耕地和水



域比例较高的区域则呈现出较低的热岛强度.通过计算各子区平均地表温度可看出,在研究区间内的多数年份,地表温度呈现出中心-近郊-远郊的梯度趋势(图6);而通过1999年11月3日和2008年3月24日的遥感影像反演出的地温,近郊区的平均地表温度则高于中心区和远郊区,这与其遥感影像的获取季节有关:Zhang 等<sup>[28]</sup>和 Meng 等<sup>[29]</sup>研究发现,在温度较低的秋冬和早春季节,中心区(或城区边缘)的高温区面积会减小,其与郊区地温之差也随之减小,甚至出现中心区(城区边缘)平均地温低于郊区地温的现象,究其原因,其一是由于建成区密集的市区受季节变化及人为排热影响,

呈现出高温季节地温较高,低温季节温度较低的特征,而郊区的林地和水域面积比例较大,具有较大的热容量,因此郊区地温随季节变化幅度较小;其二是由于低温季节郊区因秋收会出现大量的裸露地表,天气较干燥时,城区的不透水表面和郊区的裸露地表温差较小,因此热岛现象不明显.

为系统分析1997年至2009年上海市热岛扩散的模式,假设热岛强度等级为四级( $2^{\circ}\text{C} < \Delta T < 3^{\circ}\text{C}$ )和五级( $\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$ )的区域分别为次高温区及高温区,对热岛现象较明显的1997、2001、2005、2009年的高温区分布状况进行研究,可将其变化特征概括为以下几种模式(图7).

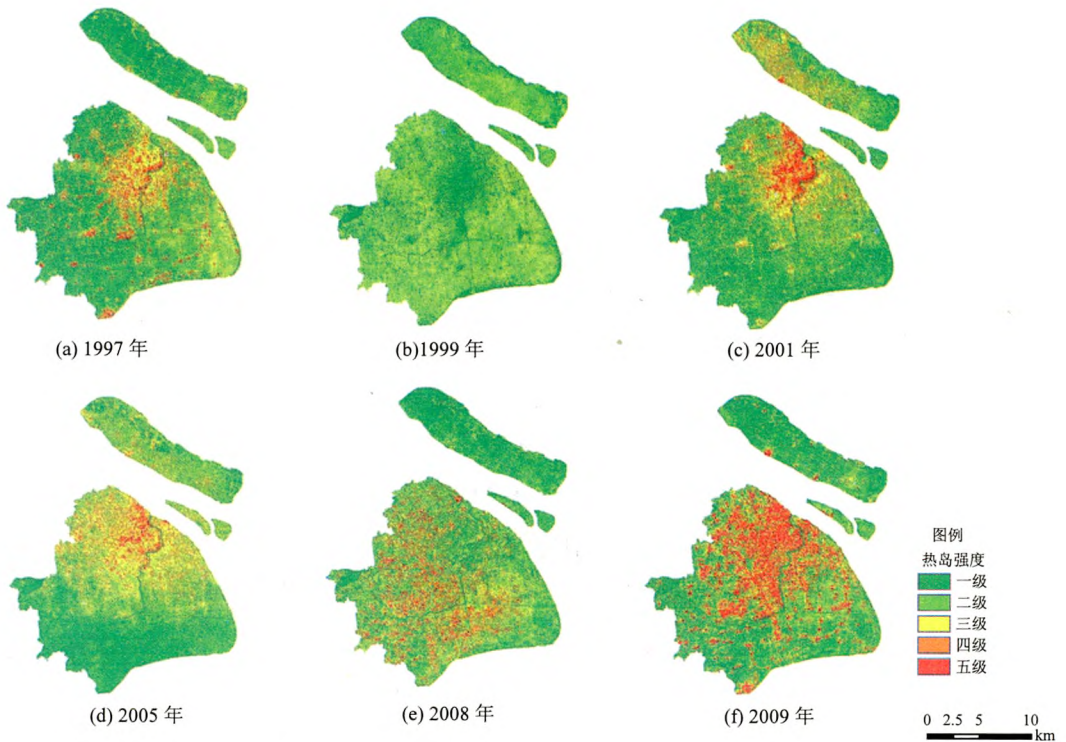


图5 上海市热岛强度分布(1997~2009年)

Fig.5 Maps of changes to urban heat island intensity, expressed in terms of expected annual UHII (1997~2009)

**2.2.1 “葫芦串”模式** 1997年,高温区和次高温区的面积比例分别为4.21%和7.10%(表2),其分布主要位于中心城区,并沿主城区周边呈环状结构向外增长,覆盖到近郊区的嘉定、青浦、松江、南桥等新城,以及远郊区的崇明、金山、

陈家镇、枫泾镇等新城和新镇.这些区域形成的热岛沿着中心城区与卫星城镇之间的主干道形成了“葫芦串型”热岛分布模式.

**2.2.2 “葡萄串”模式** 2001年,高温区及次高温区比例有所上升,分别占总面积的4.35%和

10.36%,其所覆盖区域围绕中心城区呈圈状扩散,并有明显的北拓趋势,随着新城和新市镇不断建设,原有的“葫芦串”模式逐渐演变为“葡萄串”模式,北部的明珠湖、向化镇、凤凰镇,东部的惠南镇、奉城镇,西部的华新镇、徐泾镇,西南部的朱泾镇等地区成为新的热场分布点.到了2005年,全市高温区面积比例为3.17%,有所减少,这与2000至2004年期间上海大力加强绿化建设密切相关<sup>[27]</sup>.

**2.2.3 “摊大饼”模式** 到了2009年,全市高温区和次高温区呈现出网络状大面积扩展趋势,所占比例分别为12.61%和11.63%,散状分布的热中心遍布中心区、市区边缘,并蔓延至郊区各卫星城镇,中心城区和郊区的热场连成一体,形成“摊大饼”状的发展趋势.

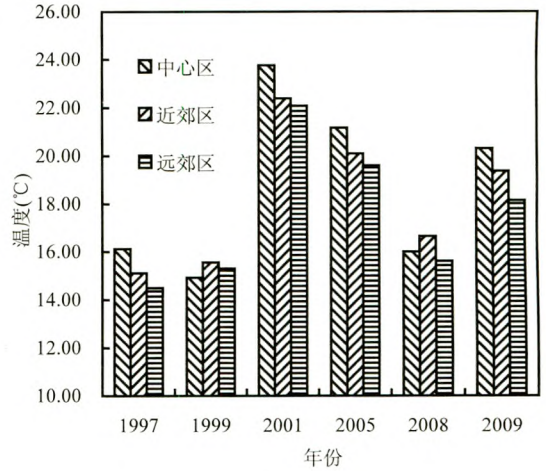


图6 各子区平均地表温度(1997~2009年)

Fig.6 Average land surface temperatures of sub-zones from 1997 to 2009

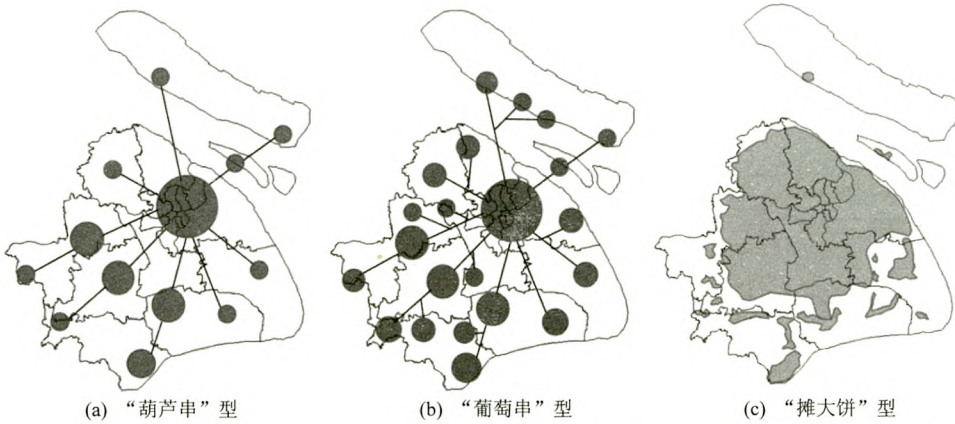


图7 热岛扩散模式(1997~2009年)

Fig.7 Distribution patterns for urban heat islands from 1997 to 2009

表2 各热岛强度等级所占比例(1997~2009)(%)

Table 2 Urban heat island intensity percentages of each level between 1997 and 2009 (%)

| 年份   | 一级    | 二级    | 三级    | 四级    | 五级    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1997 | 42.65 | 30.00 | 16.05 | 7.10  | 4.21  |
| 1999 | 40.24 | 31.98 | 26.41 | 1.27  | 0.10  |
| 2001 | 47.72 | 16.34 | 21.23 | 10.36 | 4.35  |
| 2005 | 37.91 | 24.48 | 23.41 | 11.03 | 3.17  |
| 2008 | 41.28 | 24.23 | 18.31 | 10.99 | 5.19  |
| 2009 | 40.33 | 20.63 | 14.81 | 11.63 | 12.61 |

TVX 空间内的象元轨迹反映了城市化过程中土地利用/覆盖变化所引起的热环境响应.由于建设用地的扩张所导致的土地利用类型的时空演替,使TVX空间内部分象元失去了其原始特征,开始由“冷体”或“绿体”转化为“热体”.由上文得到,研究时段内,全市建设用地扩张占据了较多的耕地、林地和水域,故下文主要针对这3种土地利用类型的变化进行分析.通过1997年至2009年区域地类转变前后地表温度和植被指数的前后对比,可以得出其中存在的“生态变化-环境响应”机制.在城市化早期,林地和耕地的聚类点主

2.3 TVX 空间的演变



要位于 TVX 空间的左上角,对应较高的植被指数和较低的地温;水域主要位于空间的左下角,对应较低的植被指数和地温.随着林地、耕地和水域被建设用地不断侵占,被占用的土地利用类型均沿其向量轨迹向空间右下角移动,象元的终点位置具有低植被指数、高地表温度的特征.各土地利用/覆盖类型的植被覆盖度和地表温度变化依次为,林地: $\Delta F_r = -0.50, \Delta T^* = 0.11$ ;耕地: $\Delta F_r = -0.43, \Delta T^* = 0.09$ ;水域: $\Delta F_r = -0.02, \Delta T^* = 0.14$ ( $\Delta F_r$ 为植被覆盖度变化, $\Delta T^*$ 为地表温度变化),表明城市化过程中,以牺牲生态用地为代价的建设用地扩张导致了地表温度的上升和植被覆盖度的减小.

远大于零(表 3),以这些控制点的变化矢量幅度作为区分某种地类地表气候状况变化与否的阈值,大于该阈值则说明地类改变引起了热环境特征的改变,在消除其不确定性后,不同土地利用/覆盖类型所引起的地表温度和植被覆盖度变化的大小不同,产生的气候效应也不同.变化向量幅度越大,由地类改变引起的热环境效应也越大.各类生态用地转变为建设用地,其变化幅度依次为:林地>耕地>水域,由此得出,生态用地的大规模减少使研究区域的地表温度上升,由林地转化为建设用地所引起的地表热环境变化幅度最大.

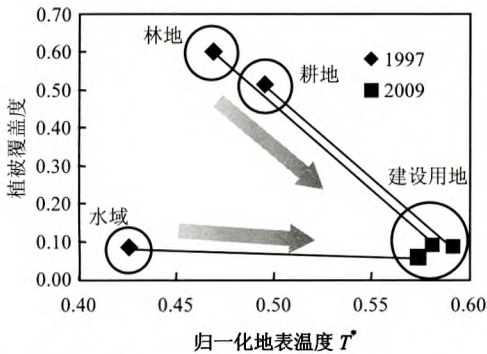


图 8 TVX 空间及各地类聚类点变化矢量 (1997~2009)

Fig.8 Change trajectory in the TVX space for the period 1997 to 2009

从象元的空间轨迹可以看出,由非建设用地转变而成的建设用地,其热环境和植被覆盖特征也有所不同.由林地和耕地转变而来的建设用地,绿色特征相对明显;而由水体转化而来的建设用地温度相对较低,植被覆盖度也偏低.因此各象元在进行地类转化后,仍保留着较小部分的原始特征.

根据 TVX 空间内的象元变化轨迹,计算其变化矢量幅度(表 3).由于空间聚类点的变化矢量中不仅包含了地类变化所引起的热环境响应,还包括了由不同遥感影像获取时间造成的不同光照、大气、地表状况等噪声信息所引起的误差,因此本研究从各土地利用/覆盖类型未变化部分的象元中选取了多个象元作为控制点来进行分析<sup>[24]</sup>.在理想状态下,控制点(林地-林地、耕地-耕地、水域-水域)的向量幅度大小应接近为零,而其实际值却

表 3 各土地类型变化矢量幅度(1997~2009 年)

Table 3 Magnitude for change vectors to urban use from 1997 to 2009

| 土地利用/覆盖类型 |        | 变化矢量幅度 |
|-----------|--------|--------|
| 1997 年    | 2009 年 |        |
| 林地        | 林地     | 14.97  |
| 林地        | 建设用地   | 51.20  |
| 耕地        | 耕地     | 15.27  |
| 耕地        | 建设用地   | 43.93  |
| 水域        | 水域     | 6.83   |
| 水域        | 建设用地   | 14.14  |

TVX 空间法的运用可为城市化进程中生态格局的现状及其演变趋势提供相应的环境响应结果.基于现有评价,后续可进一步研究该空间中各象元内部的景观结构组成和空间配置方式与城市地表特征的耦合关系,从而更有针对性地进行城市生态基础设施的合理配置,提出适应气候变化的城市可持续发展战略规划.

2.4 对城市规划及适应气候变化的启示

从上文分析可看出,在研究区间内,上海市在城市化建设过程中,建设中心逐渐从中心城区急剧扩张至近郊及远郊区,全市的热中心也随之从城区蔓延至郊区各新城及新市镇.自《总体规划》实施以来,上海围绕“现代化国际大都市”及“四个中心”的建设目标<sup>[30]</sup>,逐步形成了“多轴、多层、多核”的市域空间布局结构.从“十五”期间的“一城九镇”(指上海在“上海市国民经济和社会发展第十个五年规划”期间重点发展的 1 个新城和 9 个中心镇,即松江新城和安亭、



罗店、朱家角、枫泾、浦江、高桥、周浦、奉城、堡镇 9 个镇)。城镇试点建设,到“十一五”规划纲要中提出的“1966”(指《上海市国民经济和社会发展规划第十一个五年规划纲要(2006—2010年)》中提出的建设一批与上海国际大都市发展水平相适应的新城、新市镇(即 1 个中心城,9 个新城,60 个新市镇,600 个中心村)的城镇体系规划目标)。城镇规划体系,新城、新市镇的建设导致人口和建设用地区在城区边缘乃至郊区的集聚,郊区成为了推进上海城镇化的主要载体,疏散降低了中心城资源短缺的压力,但同时也占用了大量的生态用地。虽然全市在 2000 年到 2004 年期间大规模的绿地建设在一定程度上减小了高温区的范围,但从 2009 年的热岛的多中心、大面积分布来看,仅靠绿化建设已远不足以抵消城市土地扩张造成的热环境影响。根据《上海市城市总体规划(1999-2020)实施评估研究报告》,至 2011 年,上海市新城和新市镇的城镇建设用地已达 1839 平方公里,远超过总体规划 900km<sup>2</sup>(至 2020 年)的发展目标要求,但是中心城区周边、各卫星城镇的大量建设用地扩张并未与生态环境的建设同步进行,过快的建设用地增幅导致生态空间被进一步蚕食,尤其是《总体规划》中划定的生态敏感区(佘山风景区、崇明东滩鸟类自然保护区、淀山湖自然保护区等)、建设敏感区(外环线外侧 5 公里地带、外环线以内城乡结合部地区)、楔形绿地等生态管控区域内新增了大量建设用地,生态安全受到影响<sup>[31]</sup>。根据前文的研究,在 TVX 空间中,为各象元创造出接近其原始特征的生态条件,有利于维持地表热特征,并抑制甚至逆转“冷体”或“绿体”向“热体”发展的变化趋势。林地、耕地、水体等生态空间的重要组成部分在维持区域小气候、缓解热岛效应方面发挥着重要的作用,城市规划在提高城市绿化水平的同时,也不能忽略了对耕地、水体等生态用地的保护,应将基本农田保护、林业发展、水域保护等目标有效整合到全市的总体规划中,在规划过程中预留足够的生态空间,注重发挥其对城市的空间结构的锚固和平衡作用;应通过严格的用地管制,提高土地利用效率,控制建设用地的无序蔓延,同时推

进市域生态网络空间体系建设,保障城市开敞空间,以减缓热岛效应,适应气候变化。

### 3 结论

3.1 1997 年至 2009 年,上海市建设用地的迅速扩张造成各类生态用地被蚕食,各土地利用/覆盖类型转变为新生成建设用地的贡献程度分别为:耕地 35.99%、林地 24.59%、水域 3.71%、裸地 0.44%、滩涂 0.59%。中心区人口数量减少了 21.52%,近郊区和远郊区人口规模分别增长了 16.06%和 5.46%。

3.2 在研究时间段内,研究区域地表温度总体呈现出中心-近郊-远郊的梯度分布趋势,高温区和次高温区面积比例从 1997 年的 4.21%和 7.10%上升到 2009 年的 12.61%和 11.63%,对于特大城市上海,高热岛强度范围分布与建设用地扩张区域基本一致,形成“葫芦串-葡萄串-摊大饼型”热岛扩散模式。

3.3 采用 TVX 空间法,分析得知各类生态用地转变为建设用地后引起城市地表温度上升且植被覆盖度下降,其造成的地表热环境效应大小依次为:林地( $\Delta F_r = -0.50, \Delta T^* = 0.11$ ) > 耕地( $\Delta F_r = -0.43, \Delta T^* = 0.09$ ) > 水域( $\Delta F_r = -0.02, \Delta T^* = 0.14$ )。后续可研究 TVX 空间中各象元内部的景观格局与城市地表特征的耦合关系,以提出更有针对性的城市气候变化适应性规划。

3.4 须将基本农田保护、林业发展、水域保护等目标有效整合到全市的总体规划中,在规划过程中预留足够的生态空间,通过严格的土地利用管制,提高土地利用效率,促进城市可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision [R]. New York, 2012.
- [2] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(1): 54-63.
- [3] Lazzarini M, Marpu P R, Ghedira H. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas [J]. Remote sensing of Environment, 2013, 130: 136-152.
- [4] 陆 燕,王勤耕,翟以然,等.长江三角洲城市群人为热排放特征

- 研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(2):295-301.
- [5] Jensen J R, Cowen D C. Remote sensing of urban suburban infrastructure and socio-economic attributes [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1999,65(5):611-622.
- [6] Oke T R. The energetic basis of the urban heat-island [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982,108(455):1-24.
- [7] 张新乐,张树文,李 颖,等. 土地利用类型及其格局变化的热环境效应——以哈尔滨市为例 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2008,25(6):756-763.
- [8] Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilisation of such data in urban climatology [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989,10:1699-1720.
- [9] Cheval S, Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009,96(1):145-153.
- [10] 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 [J]. Remote sensing of Environment, 2007,106(3):375-386.
- [11] Pu R L, Gong P, Michishita R, et al. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval [J]. Remote sensing of Environment, 2006,104(2S1):211-225.
- [12] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):889-897.
- [13] 覃志豪, Zhang Ming hua, Amon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001,56(4):456-466.
- [14] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. Remote sensing of Environment, 2004,89(4):467-483.
- [15] Artis D A, Carnahan W H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas [J]. Remote sensing of Environment, 1982,12(4):313-329.
- [16] 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, 2004,03:28-32+36-41+74.
- [17] Houldcroft C. Thermal remote sensing in land surface processing [J]. Environment and Planning B - Planning & Design, 2005, 32(6):928-929.
- [18] Gillies R R, Carlson T N. Thermal remote-sensing of surface soil-water content with partial vegetation cover for incorporation into climate-models [J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(4):745-756.
- [19] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. Remote Sensing Reviews, 1994,9:161-173.
- [20] Moran M S. Estimating crop water-deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote sensing of Environment, 1994,49(3):246-263.
- [21] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote-sensing-comparative anatomy for cities [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995,16(12):2165-2185.
- [22] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996,17(3):463-487.
- [23] 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 [J]. Global and Planetary Change, 2000,25(1/2):49-65.
- [24] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements - An exploration with the simplified simple biosphere model [J]. Remote sensing of Environment, 2002,79(2/3):225-242.
- [25] Amiri R, Weng, Q H, Alimohammadi A. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran [J]. Remote sensing of Environment, 2009,113(12):2606-2617.
- [26] Gillies R R, Carlson T N, Gui J, et al. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurement of Normalized difference vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,18(15):3145- 3166.
- [27] 陈命男,张 浩,唐靖寅,等. 上海城市地表热环境多时期遥感研究 [J]. 中国环境科学, 2011,31(7):1143-1151.
- [28] Zhang H, Qi Z F, Ye X Y, et al. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China [J]. Applied Geography, 2013,44:121-133.
- [29] Meng F, Liu M. Remote-sensing image-based analysis of the patterns of urban heat islands in rapidly urbanizing Jinan, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013.34(24):8838-8853.
- [30] 上海市城市规划设计研究院. 上海市城市总体规划(1999-2020) [R]. 1999.
- [31] 上海市城市规划设计研究院. 上海市总体规划实施评估 [R]. 2013.

作者简介: 钱敏蕾(1990-),女,江苏常熟人,复旦大学硕士研究生,主要研究方向为城市生态学。