

DOI: 10.5846/stxb201605301037

韩善锐, 韦胜, 周文, 张明娟, 陶婷婷, 邱廉, 刘茂松, 徐驰. 基于用户兴趣点数据与 Landsat 遥感影像的城市热场空间格局研究. 生态学报, 2017, 37(16): 5305-5312.

Han S R, Wei S, Zhou W, Zhang M J, Tao T T, Qiu L, Liu M S, Xu C. Quantifying the spatial pattern of urban thermal fields based on point of interest data and Landsat images. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5305-5312.

基于用户兴趣点数据与 Landsat 遥感影像的城市热场空间格局研究

韩善锐¹, 韦 胜², 周 文², 张明娟³, 陶婷婷¹, 邱 廉¹, 刘茂松¹, 徐 驰^{1,*}

¹ 南京大学生命科学学院, 南京 210023

² 江苏省城市规划设计研究院, 南京 210036

³ 南京农业大学园艺学院, 南京 210095

摘要: 地图用户兴趣点 (POI) 数据能够反映微观尺度上城市系统中的人类活动。利用 2015 年夏季 Landsat 8 遥感影像提取了南京市地表温度和主要土地覆盖类型, 利用空间与非空间多元回归模型在 2、5、10 km 3 个尺度上研究了地表温度与同期 POI 密度及植被和水体盖度的相关性, 并利用方差分解技术定量区分人类活动因子 (POI 密度) 及生态基础设施 (植被和水体盖度) 对城市热场的相对重要性。结果表明, 在 3 个观测尺度上, POI 密度与地表温度均存在极显著的正相关 ($P < 0.001$), 且相关性随观测尺度的增大而升高。植被和水体均具有显著的降温效应, 水体盖度与地表温度的相关性仅在 2 km 尺度上显著, 在 5 km 和 10 km 尺度上其降温效应不再显著。方差分解结果表明, 人类活动因子和生态基础设施对地表温度的独立解释率为 1.6%—15%, 而二者共同解释率达到了 40%—70%。研究表明 POI 作为城市功能节点可以综合反映城市中人类活动的热源强度, 在城市热场空间格局研究中是一种可与遥感数据互补的有用数据源。

关键词: 城市热岛; 地表温度; 用户兴趣点; 空间分析; 方差分解

Quantifying the spatial pattern of urban thermal fields based on point of interest data and Landsat images

HAN Shanrui¹, WEI Sheng², ZHOU Wen², ZHANG Mingjuan³, TAO Tingting¹, QIU Lian¹, LIU Maosong¹, XU Chi^{1,*}

¹ School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² Jiangsu Institute of City Planning and Design, Nanjing 210036, China

³ School of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Point of interest (POI) in digital maps can effectively reflect human activities in urban systems at micro spatial scales. We retrieved land surface temperature (LST) in the Nanjing metropolitan region from a Landsat 8 image, and examined LST in relation to POI density, as well as vegetation and water cover at three spatial scales, namely, 2, 5, and 10 km. The relative importance of human factors (represented by POI density) and ecological facilities (represented by vegetation and water cover) on the thermal field patterns was quantitatively distinguished using simultaneous autoregressive models and the variation partitioning technique. The results showed that POI density and LST exhibit significantly positive correlations ($P < 0.001$) that are generally amplified with increasing observational scale. Vegetation and water cover played

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271197, 31200530)

收稿日期: 2016-05-30; 网络出版日期: 2017-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuchi@nju.edu.cn

a significant role in reducing LST; however, this cooling effect from water cover was detected only at the 2-km scale. At all three studied scales, the results from variation partitioning showed that human factors shared a considerable proportion of explanatory power with ecological facilities (40%—70%), whereas the unique explanatory power of human factors and ecological facilities ranged between 1.6% and 15%. POIs characterize urban functional nodes and can thereby serve as an effective indicator of the intensity of anthropogenic heat sources. Our results suggested that POI could be a useful data source for the study of urban thermal fields, which is complementary to remotely sensed information.

Key Words: urban heat island; land surface temperature; point of interest; spatial analysis; variation partitioning

随着全球范围内城市化进程的加速,城市居民现已占据了全世界人口的半数以上^[1]。伴随着城市规模的快速扩张,人类活动对生态系统产生了多种影响,其中一个重要方面是自然景观被硬质化不透水面所取代^[2],导致城市的热岛效应加剧,并对城市居民的健康产生负面影响^[3]。理解城市热场的空间格局特征及其形成机制对于合理布局城市绿地与水体等生态基础设施,提高人居环境质量具有重要的现实意义^[4]。

下垫面特征和人类活动是影响城市热场的主要因素^[5-6]。相关研究表明,下垫面类型的不同组合方式对城市热场分布的影响存在显著差异^[7],其中城市地表温度的高低主要与不透水面比例有关^[8],但其相关关系存在显著的时空尺度依赖性,并受到城市气候条件的影响^[2]。同时,城市内部的人类活动在城市热场的格局形成扮演重要的角色^[9]。Ryu 等研究发现人为热源、不透水面与城市三维建筑结构是影响城市热岛效应形成的 3 个主要因素^[10]。岳文泽等研究表明,上海主城区内建筑与人口密度、工业区布局、下垫面属性以及城市景观多样性是影响城市热环境空间格局的主导因子^[11]。在以往城市热场影响要素的研究中,下垫面性质的信息可利用多源遥感影像进行分类提取或定量反演来获得^[12-13],相比之下,精细尺度上人类活动数据的缺乏限制了热场形成机制研究的深入。

近年来随着互联网技术的发展,城市海量数据逐渐应用于城市空间结构、社会关系动态等相关研究中,并取得了一系列新颖的成果^[14-15]。其中,用户兴趣点(POI)是(通常在电子地图或其他应用软件中)用于描述城市空间内工业、商业、服务、生态等城市功能设施的分布的点状空间数据,早期主要用于导航、地图位置查询等功能;随着数据量的不断积累和地图精度的提高,POI 内蕴含丰富的城市空间信息受到地理学、经济学、流行病学等多领域的关注^[16]。POI 数据所表征的城市设施是城市系统中人类活动的主要载体,POI 可以记录其精确地理位置以及特定时段内人类活动的定量信息(如访客数量),从而能够在精细空间尺度上反映人类活动的类型、强度等,因此有潜力成为精细尺度上城市景观格局驱动机制研究的有用数据源。

本文以南京城市景观为研究对象,利用 Landsat 8 影像的热红外通道数据反演南京城市地表温度,利用多元统计分析技术,在多个空间尺度上研究 POI 数据对人类活动与地表温度之间的相关性,并进一步分析了 POI 表征的人类活动因子与植被和水体盖度对于城市热场影响的相对重要性,以期深入理解城市热场的空间格局,并为城市生态基础设施建设提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

南京市(31°14'—32°36' N, 118°22'—119°14' E)位于长江下游平原区,地跨长江两岸,三面环山,属亚热带季风气候区,四季分明,年平均气温 15.3℃。作为长江三角洲城市群的核心城市之一,南京市市域面积 6598 km²,2015 年总人口 823.59 万人。本研究选取南京主城周边(不包括位于南京市域南部的溧水、高淳 2 区)为研究区域,总面积约 4550 km²。

1.2 数据来源及预处理

本研究选用 Landsat 8 影像(path/row:120/38),成像时间为 2015 年 09 月 02 日 10:37,成像时刻研究区域无云覆盖,成像条件较好。影像预处理包括辐射定标和大气校正(FLAASH 模型)以及几何校正(误差控制在

0.5 个像元以内)。

POI 数据是表征城市系统中城市设施实体的点状数据,包括了公司企业、餐饮、购物、住宿、生活服务、教育、医疗、政府机构及交通设施等 21 个类型。POI 数据通过百度地图提供的应用程序编程接口,通过地图要素抓取程序从百度地图上获得。在百度地图坐标系下依次分类抓取 POI 的相关信息(名称、地理坐标等)并保存为 JSON(JavaScript Object Notation)格式。基于 JSON 数据解析生成 ESRI Shape 格式的 POI 点状要素并建立地理坐标系。

研究中采用归一化差值植被指数(NDVI)作为植被盖度的指标。水体盖度信息的获取采用改进的归一化差值水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)^[17]。该指数可有效用于地表水体提取,相关研究表明对建筑物聚集的城市水体信息提取具有较高的适用性^[18]。MNDWI 指数通过以下公式计算:

$$\text{MNDWI} = (\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{mir}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{mir}}) \quad (1)$$

式中, ρ_{green} 和 ρ_{mir} 分别为绿光波段(对应于 Landsat 8 第三波段)和中红外波段(对应于 Landsat 8 第六波段)反射率。

1.3 地表温度反演

研究采用单窗算法利用 Landsat 8 数据的热红外波段(band 10)进行地表温度反演^[19],反演公式为:

$$\text{LST} = [kT_{10}(C_{10} + D_{10}) + T_{10}^2(1 - C_{10} - D_{10}) - kD_{10}T_a] / (kC_{10}) \quad (2)$$

式中, LST 为真实地表温度, T_{10} 为亮度温度, T_a 为大气等效温度($T_a = 16.011 + 0.92621T_0$, T_0 为近地表空气温度); k 为系数, C_{10} 和 D_{10} 为中间变量($C_{10} = e_{10}t_{10}$, $D_{10} = (1 - t_{10})[1 + t_{10}(1 - e_{10})]$), t_{10} 为大气透过率, e_{10} 为地表比辐射率)。大气透过率 t_{10} 利用 Landsat 8 影像数据的大气水汽含量(w)和大气透过率(t_{10})关系进行估算;大气水汽含量则通过相对湿度(RH)和近地表空气温度(T_0)进行估算;地表比辐射率 e_{10} 取值见文献^[20]。详细的单窗算法参见^[21]。

1.4 统计分析

考虑到城市热场与其影响因素间响应关系往往具有明显的尺度效应^[2,22],本文分别将研究区划分为 2 km×2 km、5 km×5 km、10 km×10 km 3 种大小的空间单元进行多尺度研究。网格单元大小主要根据 POI 数据分布状况与研究区范围设定;取样单元过小(< 2 km)将产生大量 POI 数量为零的网格,而过大的网格单元(> 10 km)可能导致后续统计的样本数量不足。分别统计 3 个尺度下各网格内 POI 密度、地表温度均值、水体的百分盖度、植被覆盖区域的 NDVI 均值(每个网格内无植被覆盖区域不纳入统计)。

统计分析之前对 POI 密度和水体盖度进行对数变换,使得变换后数据基本呈正态分布。首先利用基于最小二乘(OLS)模型的单因素回归分析在 3 个观测尺度上分别检测 POI 密度以及植被和水体盖度与城市地表温度的相关关系。进一步建立多元回归模型以比较这 3 个因素的效应。考虑到可能普通最小二乘模型的残差存在空间自相关有可能增加犯 I 型错误的概率并影响参数估计的准确性,利用空间自回归(simultaneous autoregressive, SAR)模型来进一步评估各因子系数及其显著性^[23]。本文选择误差项中的自回归 SAR_{err} 模型^[23]。考虑到植被与水体的对于城市热场的降温效应已得到广泛关注^[8,24],本研究中首先建立基于水体与植被盖度模型(生态基础设施模型),在此基础上再进一步加入 POI 密度(全模型),通过比较模型的 AIC 与 R^2 来观察 POI 密度是否可以有效增加模型的拟合优度,并利用方差分解技术来定量区分人类活动因子(POI 密度)与生态基础设施(植被/水体盖度)对城市热场影响的相对重要性。POI、植被盖度及水体盖度之间的 Pearson 相关系数均小于 0.5,表明不存在明显的多重共线性问题。

遥感数据处理在 ENVI 5.1 和 ArcGIS 10.2 中完成,统计分析在 R 2.11.1 中完成。

2 结果

2.1 地表温度与 POI 密度、植被及水体盖度的相关性

基于单窗算法反演得到的地表真实温度与 POI 点要素分布总体上呈现出较为一致的格局特征:城市 POI

分布在长江以南的主城区相对集中,而偏离主城区的 POI 分布相对离散。研究区主城区地表温度明显高于城市边缘区和以农村为主的郊区,呈现显著的热岛效应。城市热场内部分布存在明显的空间分异,热场高温区呈现多核心的特征,热场分布与 POI 总体格局基本一致,但在部分地区存在差异(图 1)。

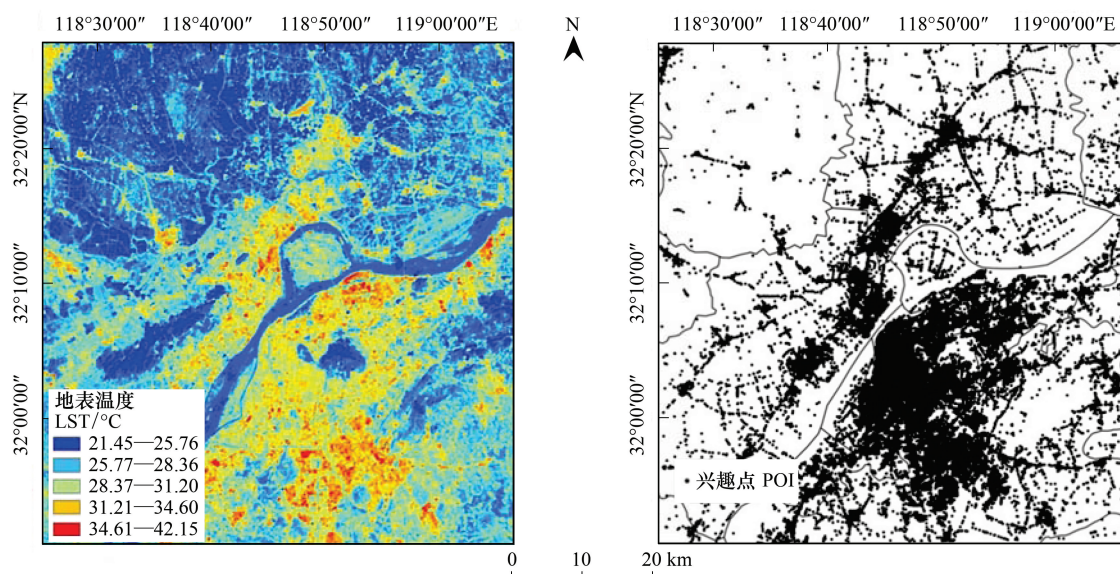


图 1 研究区地表温度空间格局与 POI 点要素分布图

Fig.1 Spatial distributions of land surface temperature and points of interest in the study area

为进一步揭示 POI 及植被与水体盖度对热场格局形成的影响,利用单因素回归分析研究地表温度与 POI 密度、植被及水体盖度的相关性。结果表明(图 2),3 种分析尺度下 POI 密度与地表均温均呈极显著正相关($P < 0.001$),且作用强度随分析尺度的增大而升高。植被盖度(NDVI)在 3 个观测尺度上均与地表均温存在极显著负相关($P < 0.001$),随观测尺度增大,相关性逐渐增强。水体盖度与地表均温仅在 2 km 尺度存在极显著负相关($P < 0.001$),在 5 km 和 10 km 观测尺度下,水体盖度与地表温度相关性不显著($P > 0.05$)。

2.2 人类活动及生态基础设施对城市热场的影响

考虑到水体与植被的降温作用和人类活动同时影响城市热场的格局,进一步利用多元回归模型研究这几个因素的相对重要性。3 个尺度上生态基础设施模型(植被/水体盖度)与全模型(POI 和植被/水体盖度)的拟合结果表明,随着观测尺度的增大,全模型及基于植被和水体盖度的 SAR 模型解释率(R^2)均逐渐升高(表 1)。为了有效识别人类活动因子及生态基础设施各自在热场形成过程中解释能力差异,基于 SAR 模型中非空间部分的解释率进行方差分解。研究发现,人类活动因子和生态基础设施的总体解释率随观测尺度的增大而升高,且在 10 km 尺度下总体解释率达到最高,为 74.5%(图 3)。考察两类因子对地表温度的独立解释率,发现人类活动因子独立解释率低于生态基础设施,且随着分析尺度的减小而逐渐升高,表明 POI 密度在较小观测尺度上对城市热场的解释能力相对较强。生态基础设施独立解释率在 3 种观测尺度上均高于人类活动因子,并随分析粒度的升高而降低。综合考察两类因子的交叉解释率发现,人类活动因子和生态基础设施的交叉解释率明显高于两者独立解释率之和,且随着观测尺度的增大,交叉解释率逐渐升高。

3 讨论与结论

在城市热场格局及其驱动因素的以往研究中,所关注的要素类型和采用的技术途径种类多样^[25],概括起来主要包括:1)地表覆盖对城市热场的影响;2)景观的空间结构对城市热场的影响;3)城市人为热源、人口密度及能量消耗等的人类活动强度对城市热场的影响。这些研究结果表明城市热场的形成是人类活动与环境因素共同作用的结果。其中大量研究表明,城市景观中的植被和水体等生态基础设施能够显著缓解城市热岛

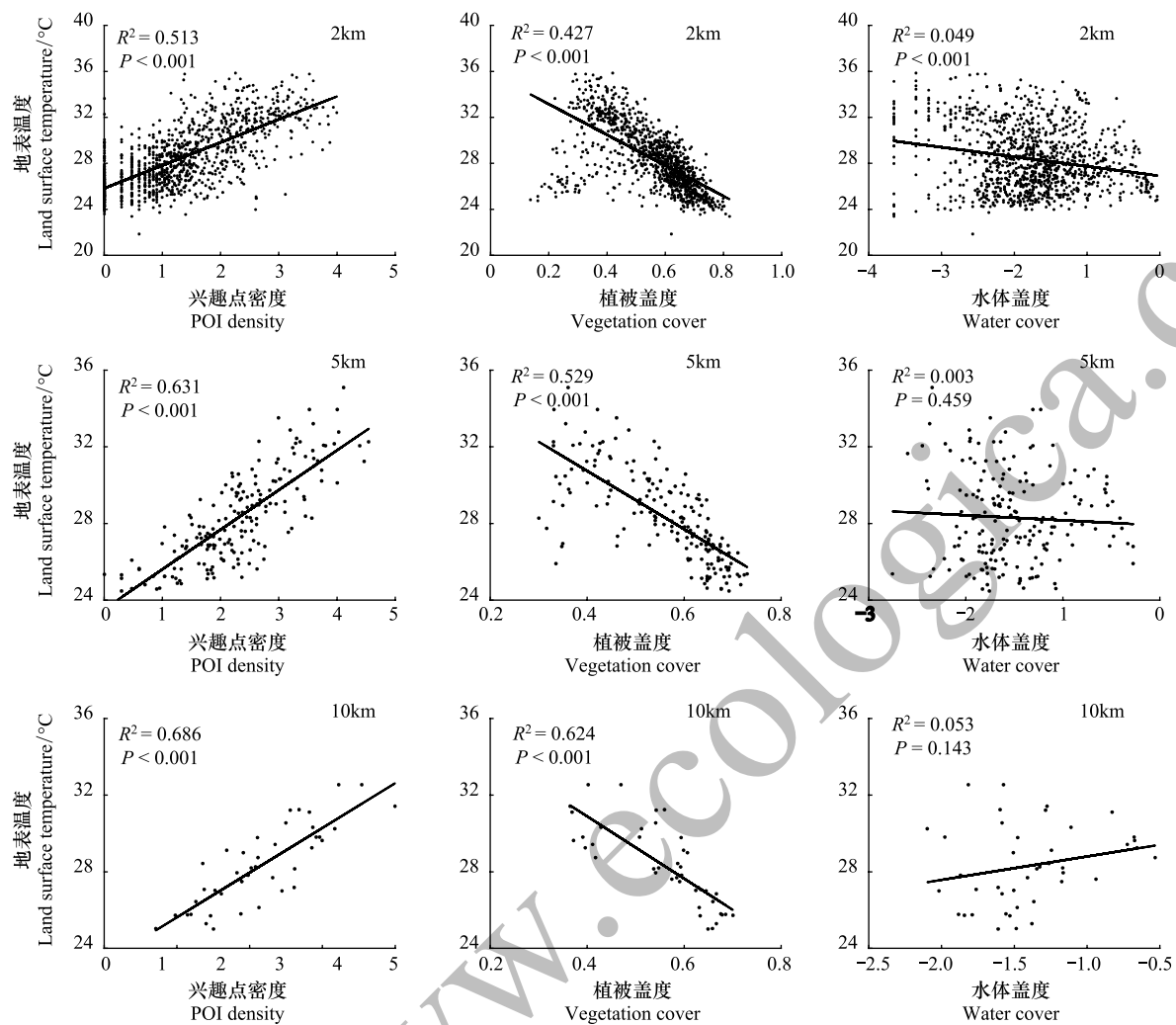


图2 地表温度在3种尺度下和POI密度、植被/水体盖度回归分析

Fig.2 Regression analysis between POI density, vegetation/water cover and land surface temperature at three observational scales

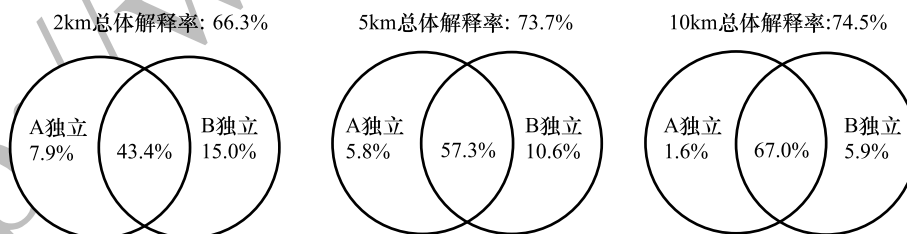


图3 人类活动因子及生态基础设施对于地表温度解释率的分解

Fig.3 Variation partitioning between human activities and ecological facilities

A 为人类活动因子(由 POI 密度所表征), B 为生态基础设施(包括水体与植被盖度)

效应^[26-27]。本研究进一步证实,植被和水体盖度与地表温度具有显著的负相关关系。在2—10 km的观测尺度上植被盖度的降温效应均达到极显著水平;水体盖度仅在2 km尺度表现出显著的降温效应,而在5 km和10 km则未达到显著水平,可能是由于在较大观测尺度上水体面积占比普遍较小,不足以产生显著的降温效应。

表 1 地表温度在 3 种尺度下普通最小二乘法与空间自回归模型结果

Table 1 Performance of the ordinary least square (OLS) and simultaneous autoregressive (SAR) models explaining the LST patterns at three observational scales

模型变量 Model variables	普通最小二乘模型 OLS model			空间自回归模型 SAR model		
	标准化系数 估计值±标准误	R^2	AIC	标准化系数 估计值±标准误	R^2	AIC
	Estimated value ± SE			Estimated value ± SE		
2 km						
生态基础设施模型 Ecological facilities model		0.587 ***	4311.90		0.853 ***	3428.3
植被盖度 Vegetation cover	-2.066 ± 0.055 ***			-1.438 ± 0.064 ***		
水体盖度 Water cover	-1.129 ± 0.055 ***			-0.681 ± 0.043 ***		
全模型 Full model		0.667 ***	4076.78		0.865 ***	3300.2
兴趣点密度 POI density	1.031 ± 0.063 ***			0.673 ± 0.057 ***		
植被盖度 Vegetation cover	-1.420 ± 0.063 ***			-1.343 ± 0.061 ***		
水体盖度 Water cover	-0.694 ± 0.056 ***			-0.609 ± 0.041 ***		
5 km						
生态基础设施模型 Ecological facilities model		0.678 ***	621.08		0.872 ***	489.53
植被盖度 Vegetation cover	-2.112 ± 0.109 ***			-1.826 ± 0.111 ***		
水体盖度 Water cover	-1.001 ± 0.109 ***			-0.968 ± 0.077 ***		
全模型 Full model		0.736 ***	585.68		0.897 ***	451.51
兴趣点密度 POI density	0.904 ± 0.142 ***			0.699 ± 0.104 ***		
植被盖度 Vegetation cover	-1.346 ± 0.155 ***			-1.420 ± 0.116 ***		
水体盖度 Water cover	-0.626 ± 0.115 ***			-0.753 ± 0.076 ***		
10 km						
生态基础设施模型 Ecological facilities model		0.716 ***	132.68		0.890 ***	106.78
植被盖度 Vegetation cover	-2.166 ± 0.219 ***			-1.700 ± 0.218 ***		
水体盖度 Water cover	-0.854 ± 0.219 ***			-0.642 ± 0.157 ***		
全模型 Full model		0.732 ***	131.14		0.892 ***	107.55
兴趣点密度 POI density	0.686 ± 0.375			0.276 ± 0.246		
植被盖度 Vegetation cover	-1.406 ± 0.467 **			-1.443 ± 0.315 ***		
水体盖度 Water cover	-0.513 ± 0.283			-0.511 ± 0.194 **		

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$

城市中居民的绝大多数活动都是在其住所与工作单位、商场、学校、公园、公交站点等各种城市功能节点之间完成。POI 可以在微观尺度上详细表征城市功能节点的空间分布,因此在 POI 密集的区位上城市居民的密度及其活动强度也相应越高,人类活动所释放热量也越高。虽然不同类型的功能节点,甚至相同类型的不同节点之间可能具有较大差异,但可以推测在适当的观测尺度上,POI 的总体密度可能是表征城市热环境的有效指标。本研究结果证实 POI 密度与地表均温存在极显著的正相关关系。通过统计模型的比较发现,在单纯基于地表覆盖因子的模型中加入 POI 密度可以显著增加模型的拟合优度,表明在揭示城市热场的空间格局特征方面,POI 的确可以提供有效的信息,这些信息与遥感信息可以互为补充,共同解释城市热场格局的空间异质性。

人类活动因子和生态基础设施对地表温度表现出较高的共同解释率(40%—70%),表明城市热场的形成受到人类活动和生态基础设施的共同作用。在 3 个尺度的 SAR 模型中,人类活动的解释能力略低于生态基础设施,随着观测尺度增大,两者独立解释能力均逐渐减弱,交叉解释率显著升高。研究结果表明,人类活动与生态基础设施对城市热场的影响具有尺度依赖性。虽然人类活动因子解释能力略低于生态基础设施,其在 2 km 尺度上最高的解释能力一定程度上说明 POI 能够作为精细尺度上城市热场研究的有效指标。

有研究表明,在较小分析尺度上影响地表温度的要素变得复杂,有更多变量需要考虑,如局部的空气流动,区域地表三维结构等都可能影响微尺度下热场分布^[28]。一般分析尺度越大,地表温度与城市景观类型占比等参数之间的相关性越强,并且对地表温度建模的拟合度越好^[29]。本研究通过回归分析及多元回归建模也发现,人类活动因子和生态基础设施与地表温度的相关性随着观测尺度的增大而增强,相应的模型拟合效果也越好。

城市热环境受到人类活动与下垫面性质等多种因素的综合影响。大量研究表明,多源遥感数据可有效用于定性和定量提取下垫面信息,并在城市热场空间格局形成机制研究中取得了良好的效果。然而在地表覆盖状况相似的条件下,不同人类活动影响下的地表温度也可表现出明显差异,因此充分理解城市热场的形成机制需要在遥感分析的基础上结合能够准确表征人类活动的的数据。以往研究中人类活动因子指标主要包括人口密度、能量消耗等^[11],由于缺少高精度的数据源,这些指标通常无法用于在精细尺度上解释热场成因。本研究发现,POI 作为城市功能节点可以综合反映城市中人类活动的热源强度,可以成为遥感信息的有效补充。其中,仅 POI 密度指标即可明显提高热场格局的解释率。随着网络技术的发展,城市系统中可获得的 POI 数据逐渐增加,精度也相应提升,POI 数据中的丰富信息有待于深入挖掘。例如,POI 数据中关于城市设施的类型以及特定设施中人口流动通量等信息可能有助于深入开展城市热岛效应的机理分析。以 POI 为代表的城市大数据在城市生态学中应用的普及将有效促进复杂城市系统中格局与过程的理解。

参考文献 (References):

- [1] Liu Z F, He C Y, Zhou Y Y, Wu J G. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 2014, 29(5): 763-771.
- [2] Ma Q, Wu J G, He C Y. A hierarchical analysis of the relationship between urban impervious surfaces and land surface temperatures: spatial scale dependence, temporal variations, and bioclimatic modulation. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1139-1153.
- [3] Su Y F, Foody G M, Cheng K S. Spatial non-stationarity in the relationships between land cover and surface temperature in an urban heat island and its impacts on thermally sensitive populations. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107(2): 172-180.
- [4] Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, Li W F, Han L J. Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures. *Landscape Ecology*, 2014, 29(1): 153-167.
- [5] Coseo P, Larsen L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain urban heat islands in Chicago. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 117-129.
- [6] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [7] Kuang W H, Liu Y, Dou Y Y, Chi W F, Chen G S, Gao C F, Yang T R, Liu J Y, Zhang R H. What are hot and what are not in an urban landscape: quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China. *Landscape Ecology*, 2015, 30(2): 357-373.
- [8] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [9] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 35-41.
- [10] Ryu Y H, Baik J J. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(5): 842-854.
- [11] 岳文泽, 徐建华. 上海市人类活动对热环境的影响. *地理学报*, 2008, 63(3): 247-256.
- [12] 周雅星, 刘茂松, 徐驰, 方芳, 钟晶晶, 张明娟. 南京市市域热场分布与景观格局的关联分析. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2199-2206.
- [13] 王宏博, 李雨光, 赵梓淇, 蔡福, 武晋雯, 许申来, 姜鹏. 基于 TM/ETM+ 数据的沈阳市各区城市热岛特征. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 219-226.
- [14] 陈映雪, 甄峰. 基于居民活动数据的城市空间功能组织再探究——以南京市为例. *城市规划学刊*, 2014, (5): 72-78.
- [15] 钮心毅, 丁亮, 宋小冬. 基于手机数据识别上海中心城的城市空间结构. *城市规划学刊*, 2014, (6): 61-67.
- [16] Chen F, Du D S. Application of Integration of spatial statistical analysis with GIS to regional economic analysis. *Geo-spatial Information Science*, 2004, 7(4): 262-267.
- [17] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [18] Ji L, Zhang L, Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*,

2009, 75(11): 1307-1317.

- [19] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, Berliner P. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [20] 吴志刚, 江滔, 樊艳磊, 陈联君. 基于 Landsat8 数据的地表温度反演及分析研究——以武汉市为例. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 135-142.
- [21] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 赵利民, 季国华. 单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度. 遥感学报, 2015, 19(6): 964-976.
- [22] 段金龙, 张学雷. 区域地表水体、归一化植被指数与热环境多样性格局的关联分析. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2812-2820.
- [23] Kissling W D, Carl G. Spatial autocorrelation and the selection of simultaneous autoregressive models. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, 17(1): 59-71.
- [24] Kong F H, Yin H W, James P, Hutyrá L R, He H S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 35-47.
- [25] Stewart I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 200-217.
- [26] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [27] 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 孙常峰, 许峰, 李文超, 张啸天. 紫金山森林公园降温效应影响因素. 生态学报, 2014, 34(12): 3169-3178.
- [28] 孟陈, 李俊祥, 朱颖, 吴彤, 肖志坚, 张国科. 粒度变化对上海市景观格局分析的影响. 生态学报, 2007, 26(7): 1138-1142.
- [29] Liang B Q, Weng Q H. Multiscale analysis of census-based land surface temperature variations and determinants in Indianapolis, United States. *Journal of Urban Planning and Development*, 2008, 134(3): 129-139.