

文章编号: 2096-3424(2021)01-0075-08

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.20015

南京市冷/热岛格局的尺度效应研究

郭 宇, 唐 明, 王宏伟, 侯梅芳, 刘信杉, 林 毅
(上海应用技术大学 生态技术与工程学院, 上海 201418)

摘 要: 城市地表覆被类型变化影响城市热环境的空间格局, 研究城市地表覆被类型与城市冷/热岛格局的相关关系, 对调节城市微气候, 改善人居环境, 提高城市韧性具有重要的意义。基于 landsat8 影像数据, 提取南京市 4 种主要地表覆被类型 (水体、植被、不透水面、建筑) 的参数; 同时利用热红外波段反演地表温度, 分别从像元 (小) 和市、区级行政区划 (大) 2 个尺度, 研究冷/热岛空间分布与主要地表覆被类型之间的关系并就其尺度效应进行了深入探讨。研究结果如下: 基于像元尺度的空间分析表明, 植被和水体的分布与冷岛空间格局具有相关性; 不同地表覆被类型的降温效应顺序为: 水体 > 植被 > 不透水面 > 建筑; 建筑和不透水面的分布与热岛空间格局具有相关性。基于市、区级行政区划尺度的空间分析表明, 4 种地表覆被类型与冷岛效应相关性较低; 建筑与不透水面与热岛效应相关性较高, 其中建筑与热岛效应相关性最高 ($R^2=0.95$)。总体而言, 基于小尺度的研究能反映地表覆被类型与冷/热岛空间分布的相关关系, 而基于大尺度的研究则从数据统计的角度反映城市热环境的综合特征。研究有助于城市规划者理解城市冷/热岛形成的尺度特征, 为应对全球气候变化, 合理规划城市布局, 促进城市可持续发展提供参考。

关键词: 城市热环境; 冷/热岛; 尺度特征; 土地覆被类型

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A

Study on the Scale Effect of the Cold/Heat Islands Pattern in Nanjing

GUO Yu, TANG Ming, WANG Hongwei, HOU Meifang, LIU Xinshan, LIN Yi
(School of Ecological Technique and Engineering, Shanghai Institute of Technology,
Shanghai 201418, China)

Abstract: Changes in urban land cover types affect the spatial pattern of urban thermal environments, and the relationship between urban land cover types and urban cold/heat island patterns is of great significance for regulating urban microclimate, improving human settlements and improving urban resilience. Based on the landsat8 Satellite imaging data, the parameters of the four main types of land cover (water, vegetation, impervious surface, building) in Nanjing were extracted, at the same time, the surface temperature was retrieved using the thermal infrared band. The relationship between the spatial distribution of cold/heat islands and the main land cover types was studied from two scales: pixel (small) and city and district administrative division (middle), and the scale effect was discussed in depth. The results are as follows:

收稿日期: 2020-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(41171250); 上海高等学校一流研究生教育引领计划(沪教委高[2019]22号-24)资助

作者简介: 郭宇(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市热环境。E-mail: 2528814571@qq.com

通信作者: 王宏伟(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为生态学。E-mail: 18632321@qq.com

引文格式: 郭宇, 唐明, 王宏伟, 等. 南京市冷/热岛格局的尺度效应研究 [J]. 应用技术学报, 2021, 21(1): 75-82+87.

Citation: GUO Yu, TANG Ming, WANG Hongwei, et al. Study on the Scale Effect of the Cold/Heat Islands Pattern in Nanjing[J].

Journal of Technology, 2021, 21(1): 75-82+87.



The spatial analysis based on the pixel scale shows that the distribution of vegetation and water is related to the spatial pattern of cold islands; the order of cooling effects of different types of surface types is: water > vegetation > impervious surface > building; the distribution of buildings and impervious surfaces is related to the spatial pattern of the heat island. The spatial analysis based on the scale of administrative divisions of cities and counties shows that the four types of land cover have a lower correlation with the cold island effect; buildings and impervious surfaces are highly correlated with heat island effects, and in particular, buildings and heat island effects have the highest correlation ($R^2=0.95$). In general, research based on small scale can reflect the correlation between surface cover types and spatial distribution of cold/heat islands, while research based on mesoscale reflects the comprehensive characteristics of urban thermal environment from a statistical perspective. The research can help urban planners understand the scale characteristics of urban cold/heat island formation, and provide a reference for coping with global climate change, rationally planning urban layout, and promoting sustainable urban development.

Key words: urban thermal environment; cold/heat island; scale feature; land cover type

2018年10月8日联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在韩国仁川发布报告称,全球气温或提前升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,人类需尽快采取行动^[1]。全球气候变化背景下城市极端高温事件频发^[2-3],特别是城市化进程中具有较大热容量的植被、水体等自然景观被大量的人工不透水面所取代,导致城区温度明显高于郊区,城市热岛效应明显^[4-6],加剧了城市极端高温发生的范围和强度,严重影响城市气候和居民的生活质量^[7],增加了城市居民的高温健康风险^[8],降低了城市生态系统服务价值^[9]。

近年来,国内外相关学者利用遥感卫星获取具有空间连续性的热红外地表温度(land surface temperature, LST),对城市地表热环境的时空变化特征及其与城市不同地表景观之间的相关性展开了大量研究^[10-13]。发现城市中不同土地覆被类型如水体、植被、不透水面、建筑等因热容量、反射率等性能差异而呈现出不同程度的冷/热岛效应,影响城市的冷/热岛空间分布格局^[9, 11, 14-19]。基于不同空间分辨率进行地表覆被类型与城市冷/热岛效应关系尺度效应的研究已得到学者的广泛关注^[20-21],如Weng等^[22]使用不同空间分辨率的遥感影像分析了地表温度与植被覆盖度的关系,发现二者的相关性在空间分辨率为 120 m 时达到最大;孟宪磊^[23]以上海市为例,从 $1\sim 8\text{ km}$ 的空间尺度上研究植被、水体、不透水面与城市冷/热岛关系的多尺度效应,研究表明随着研究尺度的增大植被缓解热岛效应的作用减弱,水体的作用增强,不透水面的尺度效应不明显。Min等^[24]以南京都市圈为例,选取多种网格尺寸进行4种地表特征参数与地表温度的相关性研究,结果发现 300 m 网格尺寸最具解释力,为该研究的最佳空间尺度。韩善锐等^[25]在

$2\sim 10\text{ km}$ 的空间尺度上研究了南京市主城周边地表温度与植被和水体盖度的相关性,结果发现随尺度增大植被盖度与地表温度呈逐渐增强的极显著负相关关系,而水体盖度与地表均温仅在 2 km 尺度存在极显著负相关,更大尺度上相关性不显著。综上所述,此前关于地表覆被类型与城市冷/热岛效应的多尺度研究均基于不同理想空间网格尺寸,缺乏对更易受综合人类活动因素影响的行政区划角度进行多尺度对比探究。

因此,本文利用landsat8遥感影像获取的地表温度及地表参数数据,以南京市为研究对象,分别从小尺度(基于像元)和大尺度(基于市、区级行政区划)探讨地表参数、不同地表覆被类型与城市冷/热岛效应的内在关系。本研究有助于深入认识城市地表参数与城市冷热岛形成机理,有助于协调城市冷/热岛空间布局、实施合理的城市规划、提高城市应对气候变化的韧性和为实现城市的可持续发展提供科学支持。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域概况

南京市位于长江下游,江苏省西南部,是江苏省省会及政治、经济、文化中心,也是一带一路战略与长江经济带战略交汇的节点城市,南京都市圈核心城市。南京属于北亚热带湿润气候,三面环山,地跨长江两岸,雨量充沛,冬夏长、春秋短,冬夏温差显著。截止2017年,南京市常住人口为833.5万人,城镇化率为82.29%,主城区已完全城镇化,建成区面积达 $1\,398.69\text{ km}^2$ 。高度的城市化、城市规模的不断扩大及高强度的经济活动导致南京市一直处于全国火炉城市名单的前列。

1.2 数据源

本研究选取成像质量良好的南京市 2017 年 7 月 21 日 landsat8 遥感影像数据(行列号: 120-38), 影像数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 数据处理级别为 L1T, 无需进行辐射校正和几何校正^[26]。利用 landsat8 的 OLI 陆地成像仪所获得地表参数数据, 由于 TIRS 热红外传感器的第 11 波段存在较大误差, 因此采用 TIRS10 波段反演获得地表温度数据^[27]。辅以源于 GADM 数据库的南京市行政地图定义研究边界, 该数据库将南京市分为 6 区(行政区包含玄武区、秦淮区、雨花台区、鼓楼区、建邺区和栖霞区)。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

本研究进行地表温度反演的方法为辐射传输方程法(radiative transfer equation, RTE), 也称大气校正法。该方法首先估计大气对地表热辐射的影响, 然后从卫星传感器所观测到的热辐射总量减去这部分大气影响, 得到地表热辐射强度, 再将该热辐射强度转化为相应的地表温度^[28]。则大气辐射方程为^[6]:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon B(T_S) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] \tau + L^{\uparrow} \quad (1)$$

式(1)为大气辐射传输方程, 式中: L_{λ} 为卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值, 由大气向上辐射亮度 L^{\uparrow} 、地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量和大气向下辐射到达地面后反射的能量 L_{\downarrow} 共 3 个部分组成; ε 为地表比辐射率; T_S 为地表真实温度, 单位为 K; $B(T_S)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率。温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_S)$ 计算公式如下^[29]:

$$B(T_S) = [L_{\lambda} - L^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] / (\tau\varepsilon) \quad (2)$$

L^{\uparrow} 、 L_{\downarrow} 、 τ 大气剖面参数通过在 NASA 提供大气校正参数计算器(ACPC)(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)中输入成像时间及中心经纬度获得。TIRS 的 Band10 热红外波段与 TM/ETM+6 热红外波段范围相近, 因此采用 TM/ETM+6 相同的地表比辐射率计算方法, 使用 Sobrino 提出的 NDVI 阈值法计算地表比辐射率 ε ^[30]。

$$\varepsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (3)$$

式中: P_v 是植被覆盖度。计算公式如下:

$$P_v = [(NDVI - NDVI_{Soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{Soil})] \quad (4)$$

式中: NDVI 为归一化植被指数, 见式(6); $NDVI_{Soil}$ 为

完全被裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, $NDVI_{veg}$ 代表纯植被像元的 NDVI 值。取经验值 $NDVI_{veg} = 0.70$ 和 $NDVI_{Soil} = 0.05$, 即当某个像元的 NDVI 大于 0.70 时, P_v 取值为 1; 当 NDVI 小于 0.05, P_v 取值为 0。

T_S 可以用普朗克公式函数获取:

$$T_S = K_2 / \ln [K_1 / B(T_S) + 1] \quad (5)$$

式中: K_1 、 K_2 为转换参数, 对 landsat8-TRIS 数据, $K_1 = 774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

2.2 冷/热岛范围界定

基于气象站点的传统城市冷/热岛范围界定的研究局限于点的概念研究, 很难准确到反映具有空间连续性的城市结构面上^[31], 具有一定的局限性。因此本研究选用均值-标准差分类法^[32]以 landsat8 数据反演的地表温度为基础来界定南京市冷/热岛的范围。

均值-标准差分类法以地表温度均值与标准差的倍数组合作为依据划分热场^[33], 此方法相较于等间距分级法具有能较好地反映不同地表的温度变异细节和体现热环境的空间分布的优势^[34]。本研究分别选取高或低于研究区温度均值(μ)一个标准差(std)的地表温度阈值作为热岛或冷岛的界定标准(见表 1)。

表 1 基于均值-标准差分类法的温度分级

Tab.1 Temperature grading based on the mean-standard deviation classification

区域(region)	温度阈值(temperature threshold)
热岛(heat island)	$T > \mu + std$
冷岛(cold island)	$T < \mu - std$

2.3 研究尺度的界定

本研究所涉及的像元尺度的空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 市、区级行政区划尺度的面积均大于 100 km^2 。根据姚远等^[18]提出的关于城市地表热岛效应研究尺度等级的划分标准, 将基于像元尺度的研究界定为小尺度研究, 基于市、区级行政区划尺度的研究界定为大尺度研究。

2.4 地表参数计算

2.4.1 归一化植被指数(NDVI)

NDVI 指数能将植被从水和土中分离出来, 能反映植被生长状态及植被覆盖度, 其值越高表示植被覆盖度越大^[35], 见式(6)。

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (6)$$

式中: NIR 表示近红外波段反射率; Red 表示红光波段反射率。

2.4.2 改进的归一化水体指数(MNDWI)

由于传统水体指数(NDWI)提取城市中的水体

效果较差, Hu 等^[36]提出的改进的归一化水体指数(MNDWI)能很好地区分阴影和水体,更适用于提取城镇范围内的水体,见式(7)。

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}} \quad (7)$$

式中: Green 表示绿光波段反射率; MIR 表示中红外波段反射率。

2.4.3 归一化建筑指数(NDBI)

查勇等在杨山引进国际通用建筑指数定义仿归一化植被指数的基础上提出归一化建筑指数(NDBI),根据在近红外和中红外波段之间城镇灰度值增高,其他地类灰度值均变小的规律^[37-38],能较为准确地提取城镇等建筑用地信息,其值越大表明建筑越密集^[39],见式(8)^[40]。

$$\text{NDBI} = \frac{\text{MIR} - \text{NIR}}{\text{MIR} + \text{NIR}} \quad (8)$$

式中: MIR 表示中红外波段反射率; NIR 表示近红外波段反射率。

2.4.4 归一化不透水面指数(NDISI)

城镇等人类活动强度较大的地区其表面往往通过水泥、沥青、混凝土等不透水材料所覆盖,不透水面覆盖的研究能较大程度上反映城市建筑的发展变化,而城市的不透水面有其独特的波谱反射率。归一化不透水面指数(NDISI)通过复合波段的方法构建,能有效区别不透水面与土壤,并排除其他地物的影响,信息纯度较高^[41],见式(9)。

$$\text{NDISI} = \frac{\text{TIR} - (\text{MNDWI} + \text{NIR} + \text{MIR}_1) / 3}{\text{TIR} + (\text{MNDWI} + \text{NIR} + \text{MIR}_1) / 3} \quad (9)$$

式中: TIR 表示热红外波段反射率; MNDWI 表示改进的归一化水体指数; NIR 表示近红外波段反射率;

MIR₁ 表示中红外 1 波段反射率。

3 结果与分析

3.1 地表温度分布与地表参数关系分析

通过 ENVI5.1 软件进行地表温度反演计算得到南京市地表温度,结果如图 1 所示;通过式(6)~式(9)利用 ENVI 软件的波段计算功能得到相应的地表参数分布状况,结果如图 2 所示。分别对比地表温度与 4 种主要地表参数图(图 1、图 2)可以发现,南京市高温区在空间上与归一化建筑指数(NDBI)和归一化不

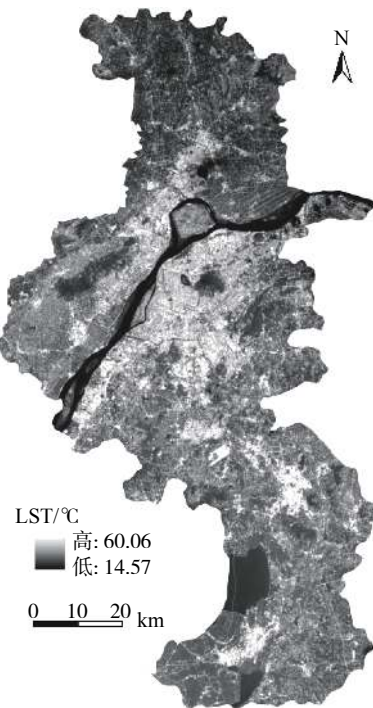


图 1 南京市地表温度分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of land surface temperature in Nanjing

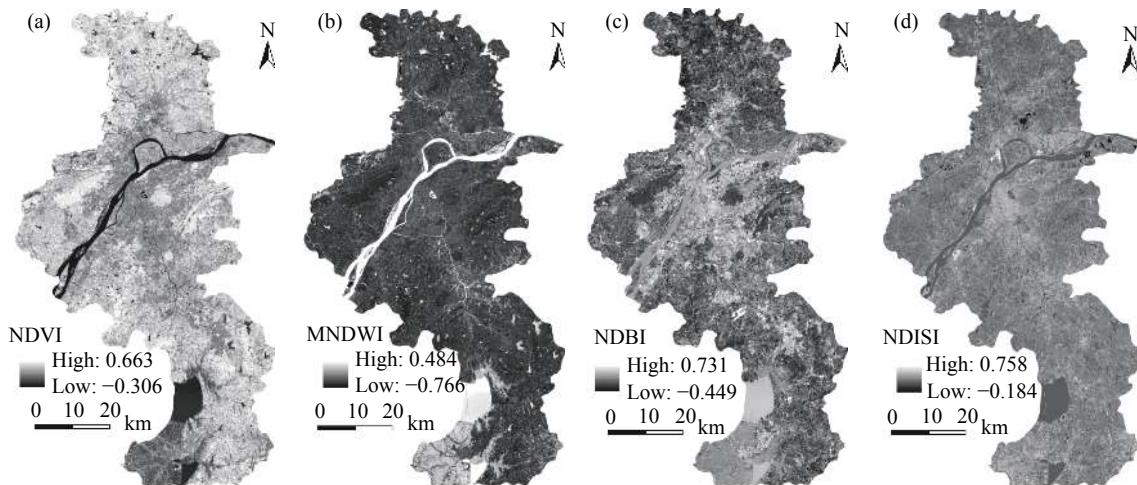


图 2 主要地表参数分布图

Fig. 2 Distribution map of main surface parameter

透水指数(NDISI)的高值区域一致性较强,而南京市低温区的空间分布与归一化植被指数(NDVI)和改进的归一化水体指数(MNDWI)的高值区域空间一致性较强。由此可以得出建筑密集和地面硬化对城市热岛效应的产生有直接的驱动作用,而植被和水体等地表覆被类型能有效降低地表温度,产生一定的冷岛效应。

3.2 地表覆被类型提取

从图 2 中可以看出各地表参数指数越大,图像灰度值越大,越符合某地表地表覆被类型的特征。根据式(6)~式(9)对遥感数据进行增强处理,选取合适的阈值提取南京市的植被、水体、建筑及不透水面信息。根据南京市的实际情况及相关指数的特征,结合相关统计数据,经多次试错后获取合适的阈值,并经高分卫星数据验证其精确性(见表 2)。

表 2 各地表参数阈值表

Tab. 2 Threshold of surface parameters

	NDVI	MNDWI	NDBI	NDISI
阈值 (threshold)	0.30	0.10	-0.15	0.35

3.3 冷/热岛分布与地表覆被类型关系分析

根据表 2 的阈值提取出南京市 4 种相应的地表覆被类型,然后分别选取植被、水体、建筑、不透水面与冷/热岛叠加分析,进行空间关系的研究。

3.3.1 4 种地表覆被类型与热岛的叠加分析

图 3 中深色斑块表示热岛未与相应地表覆被重叠的部分,对比图 3(a)和图 3(b)发现建筑与热岛的重合度高于不透水面与热岛的重合度,说明建筑的热岛效应大于不透水面。如图 3(c)所示,水体与热岛间存在一定的空间距离,表明水体在一定范围内存在冷岛效应,与前人的研究结果相符^[42-45]。如图 3(d)所示,

植被与热岛的空间间距较小,广泛分布于热岛区域的破碎斑块间,对热岛斑块的破碎化起相当重要的作用。已有大量研究表明水体和植被具有一定的冷岛效应^[46-48],结合图 3(c)和图 3(d)发现水体和植被能将热岛区域分割破碎化,利于化解连片热岛的出现。

3.3.2 4 种地表覆被类型与冷岛的叠加分析

从图 4(a)和(b)可以看出,建筑和不透水面在空间格局上镶嵌于冷岛斑块间,破坏冷岛斑块的空间连续性;建筑与冷岛重叠度极低,而不透水面与冷岛重叠区域稍大,说明建筑与冷岛空间分布的对立性大于不透水面与冷岛间对立性,表明可能存在特定类型不透水面与冷岛具有一定相关性。如图 4(c)所示大型水体和冷岛重叠度大,但存在面积较小的水体未产生冷岛或冷岛效应不明显,表明水体只有达到一定面积阈值才能产生较为明显的冷岛效应^[49-50]。如图 4(d)所示,冷岛往往分布于大片绿地内部,冷岛面积明显低于植被覆盖面积,且存在较多植被内部并未有冷岛的产生,表明植被的冷岛效应也需要达到一定的面积阈值,且该阈值理论上应高于水体^[51-52]。对比图 4(c)和(d)可以得出植被的冷岛效应低于水体的冷岛效应。

基于像元尺度的 4 种城市主要地表覆被类型与冷/热岛叠加分析的研究发现,城市热岛主要由建筑和不透水面造成,城市冷岛主要基于水体和植被形成,且就降温效应(即冷岛效应)而言可以定性得出水体>植被>不透水面>建筑的结论。就热岛空间分布而言,植被和水体起使热岛斑块破碎化的作用^[53],均可定性得出与热岛效应存在负相关关系^[54-55];就冷岛效应而言,植被和水体的冷岛效应的产生均存在一定的面积阈值,且冷岛的空间分布与该地表覆被类型存在明显的空间重叠性,表明其冷岛效应具有空间限制性^[56]。

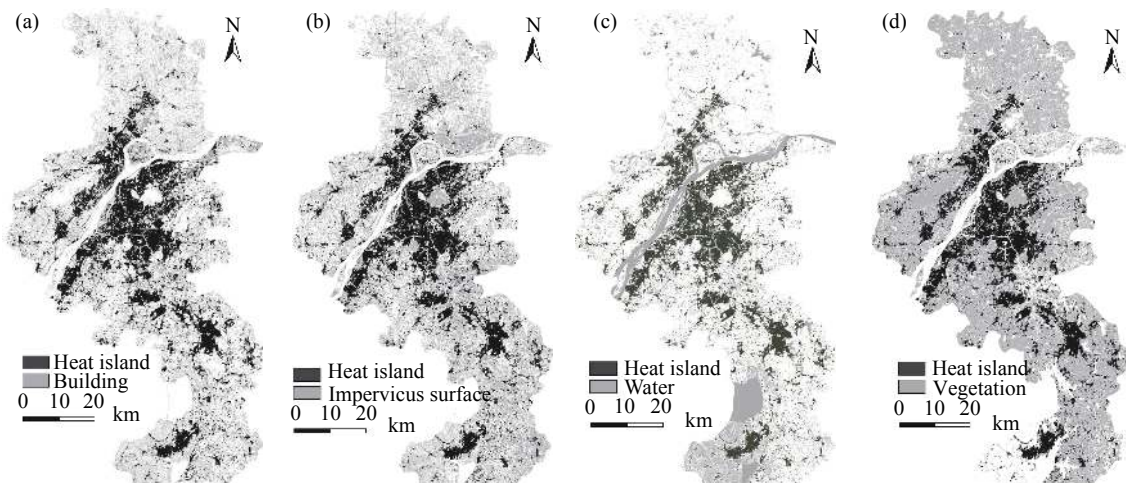


图 3 建筑、不透水面、水体、植被与热岛叠加分布图

Fig. 3 Distribution map of the heat island with the building, impervious surface, water and vegetation

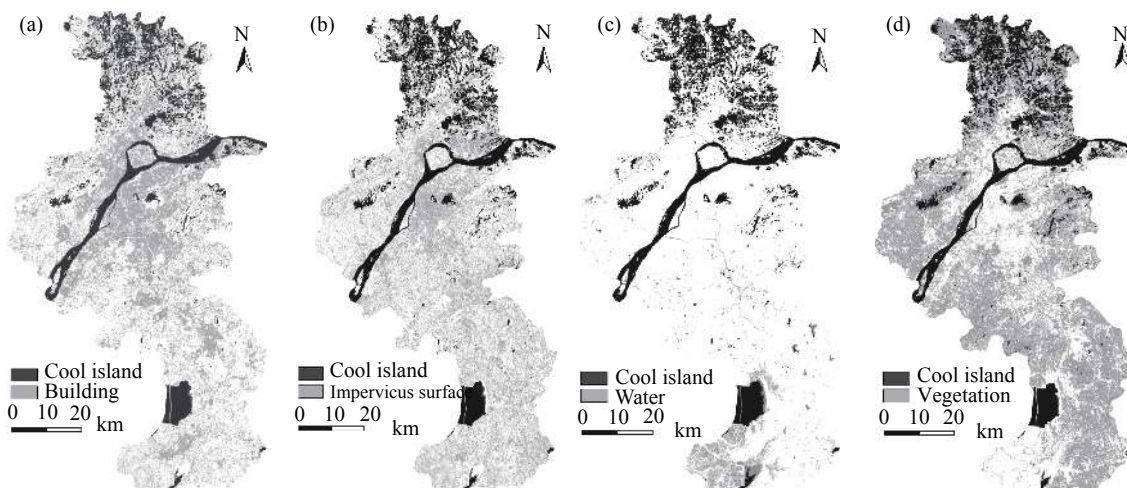


图 4 建筑、不透水面、水体、植被与冷岛叠加分布图

Fig. 4 Distribution map of the cool island with the building, impervious surface, water and vegetation

3.4 基于行政区划尺度的地表覆被类型与冷/热岛关系分析

本文基于 GADM 数据库提供的行政区划矢量图将南京市划分为 6 区, 利用 GIS 软件统计出南京市及各不同地表覆被类型面积比及冷/热岛面积比, 并分别将冷/热岛面积比与不同地表覆被类型进行回归分析(见表 3)。

表 3 不同地表覆被类型分别与冷/热岛回归分析

Tab. 3 Regression analysis of different surface types and cold/heat islands

面积比 (area ratio)	冷岛 (cold island)		热岛 (heat island)	
	线性回归系数 (linear regression coefficient)	R^2	线性回归系数 (linear regression coefficient)	R^2
建筑 (building)	-0.246	0.055	1.011	0.950
不透水面 (impervious surface)	-0.887	0.263	1.359	0.635
水体 (water)	-0.436	0.010	-0.008	0
植被 (vegetation)	0.229	0.091	-0.509	0.461

Note: Sample values are at 95% confidence level.

如表 3 所示, 基于市、区级行政区划尺度的相关性分析发现, 冷岛与所有地表覆被类型间的相关性均较低, 且只有植被面积比与冷岛面积比呈较弱的正相关关系^[57], 而其他地表覆被类型面积比均与冷岛面积比呈较弱的负相关关系。建筑和不透水面面积比与热岛面积比间均存在较强的正相关关系^[58], 且相关性显著, 特别是建筑面积比的 R^2 高达 0.95; 植被面积比与热岛面积比呈负相关关系 ($R^2=0.461$), 水体面积比与热岛面积比间存在极弱的负相关关系^[59] ($R^2=0$)。

通过线性回归系数可以看出不透水面与热岛的线性回归系数最大, 与冷岛的线性回归系数最小, 不

透水面面积占南京市市区级行政区面积之比每增大 1%, 热岛面积所占比例将增大 1.3%, 表明不透水面的热岛效应最显著。相反, 植被与热岛的线性回归系数最小, 而与冷岛的线性回归系数最大, 植被面积占南京市市区级行政区面积之比每增大 1%, 热岛面积所占比例将减小 0.5%, 表明植被对热岛的抑制作用最显著。因此从表 3 可以看出, 基于市、区级行政区划尺度研究发现地表覆被类型的冷岛效应存在植被 > 水体 > 建筑 > 不透水面的关系。

基于市、区级行政区划尺度的地表覆被类型与冷/热岛回归分析研究发现, 除植被外, 建筑、不透水面、水体均与冷岛呈负相关关系, 以往水体冷岛效应研究均基于较小尺度分析, 此处水体与冷岛的负相关关系与之前的研究不同, 可由水体面积及水体产生冷岛的范围有限^[45] 或夏季水体长时间接受太阳辐射其温度与周围环境温度相似解释^[60]; 而除水体外的地表覆被类型与热岛间的相关性均较高, 水体与热岛间存在极弱的负相关关系, 表明水体在大尺度上的降温效应不明显。

基于像元的小尺度研究发现地表覆被类型的冷岛效应存在水体 > 植被 > 不透水面 > 建筑的关系, 植被和水体与热岛效应存在负相关关系, 而基于市、区级行政区划的大尺度研究发现各地表覆被类型与冷岛之间相关性较弱, 冷岛效应存在植被 > 水体 > 建筑 > 不透水面的关系, 而水体与热岛间负相关关系极弱。这主要是由于小尺度叠加分析研究能从空间布局上分析获得各地表覆被类型与冷岛效应的关系, 而大尺度研究脱离空间关系, 仅从统计角度分析其相关性, 也可从冷岛效应作为城市局地微气候现象^[61-62] 加以解释, 同时也表明南京市夏季热岛现象较明显, 仍以热岛现象作为城市热环境的主导, 亟需通过加大绿地和水体的布置来缓解城市热岛。

4 结 语

总体而言,建筑和不透水面的热岛效应显著,而水体和绿地均具备产生局地冷岛效应的作用,因此在城市规划时需要控制建筑和不透水面的发展建设,建筑设计时可考虑设计立体绿化和绿色屋顶,以缓解建筑的热岛效应;在进行城市水体和绿地规划设计时应充分考虑到二者冷岛效应的面积阈值,考虑其对热岛斑块的破碎化作用合理分布城市绿地和水面,以期形成城市热岛空间分布彻底破碎化及冷岛空间分布的连片化,削弱城市热岛效应,提高城市韧性。从不同尺度进行了对城市冷/热岛效应与 4 种主要地表覆被类型的初步研究,对于城市绿地和水面冷岛效应面积阈值及各地表覆被类型组合的冷/热岛效应关系,仍有待深入探讨研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Global Warming of 1.5 °C [R] . <https://www.ipcc.ch/sr15/>, [2018-10-8] .
- [2] 杨涵洧, 马悦, 史军. 全球变暖背景下长江三角洲夏季高温时空演变研究 [J] . 长江流域资源与环境, 2018, 27 (7) : 1544-1453.
- [3] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市群化发展对极端高温事件空间格局的影响 [J] . 科学通报, 2017, 62 (2-3) : 233-244.
- [4] YUE W Z, LIU X, ZHOU Y Y, *et al.* Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities [J] . *Science of The Total Environment*, 2019, 671: 1036-1046.
- [5] 张硕, 刘勇洪, 黄宏涛. 珠三角城市群热岛时空分布及定量评估研究 [J] . 生态环境学报, 2017, 26 (7) : 1157-1166.
- [6] 李红, 高嵩, 解韩玮. 昆明市主城区热环境及其影响因素的时空演化特征 [J] . 生态环境学报, 2018, 27 (10) : 1916-1924.
- [7] FANG Z S, ZHANG L, MAK C M, *et al.* Investigation into sensitivities of factors in outdoor thermal comfort indices [J] . *Building and Environment*, 2018, 128: 129-142.
- [8] HU K J, YANG X C, ZHONG J M, *et al.* Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data [J] . *Environmental Science and Technology*, 2017, 51 (3) : 1498-1507.
- [9] ZHOU D Y, TIAN Y Y, JIANG G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China [J] . *Ecological Indicators*, 2018, 95: 152-164.
- [10] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型 [J] . 生态学报, 2017, 37 (23) : 7769-7780.
- [11] 孙宗耀, 孙希华, 徐新良, 等. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例 [J] . 生态环境学报, 2018, 27 (7) : 1313-1322.
- [12] NASTRAN M, KONAL M, ELER K. Urban heat islands in relation to green land use in european cities [J] . *Urban Forestry and Urban Greening*, 2019, 37: 33-41.
- [13] PAN Z K, WANG G X, HU Y M, *et al.* Characterizing urban redevelopment process by quantifying thermal dynamic and landscape analysis [J] . *Habitat International*, 2019, 86: 61-70.
- [14] 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.
- [15] 李翔泽, 李宏勇, 张清涛, 等. 不同地被类型对城市热环境的影响研究 [J] . 生态环境学报, 2014, 23 (1) : 106-112.
- [16] 陈康林, 龚建周, 陈晓越. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征 [J] . 生态学杂志, 2017, 36 (3) : 792-799.
- [17] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 等. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系 [J] . 应用生态学报, 2017, 28 (8) : 2621-2628.
- [18] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展 [J] . 生态学报, 2018, 38, 3: 1134-1147.
- [19] LI W F, CAO Q W, LANG K, *et al.* Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature [J] . *Science of The Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [20] LUO X B, PENG Y D. Scale effects of the relationships between urban heat islands and impact factors based on a geographically-weighted regression model [J] . *Remote Sensing*, 2016, 8 (9) : 760.
- [21] 彭义东. 城市热岛与地表参数的关系及其尺度效应研究 [D] . 重庆: 重庆邮电大学, 2017.
- [22] 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.
- [23] 孟宪磊. 不透水面、植被、水体与城市热岛关系的多尺度研究 [D] . 上海: 华东师范大学, 2010.
- [24] MIN M, CHEN L, DUAN X J, *et al.* Spatial distribution and driving force analysis of urban heat island effect based on raster data: A case study of the Nanjing metropolitan area, China [J] . *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101637.
- [25] 韩善锐, 韦胜, 周文, 等. 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 [J]. 生态学报, 2017, 37 (16): 5305-5312.
- [26] 初庆伟, 张洪群, 吴业伟, 等. Landsat-8卫星数据应用探讨 [J]. 遥感信息, 2013, 28 (4): 110-114.
- [27] 徐涵秋. 新型Landsat8卫星影像的反射率和地表温度反演 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (3): 741-747.
- [28] 邓书斌. ENVI遥感图像处理方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 1-474.
- [29] 侯宇初, 张冬有. 基于Landsat8遥感影像的地表温度反演方法对比研究 [J]. 中国农学通报, 2019, 35 (10): 142-147.
- [30] SOBRINO J A, JIMENEZ-MUNOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90 (4): 434-440.
- [31] DU H Y, WANG D D, WANG Y Y, *et al.* Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River delta urban agglomeration [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 461-470.
- [32] 程晨, 蔡喆, 闫维, 等. 基于Landsat TM/ETM+的天津城区及滨海新区热岛效应时空变化研究 [J]. 自然资源学报, 2010, 25 (10): 1727-1737.
- [33] KACHAR H, VAFSIAN AR, MODIRI M, *et al.* Evaluation of spatial and temporal distribution changes of l_{st} using landsat images (case study: TEHRAN) [J]. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-1-W5: 351-356.
- [34] 程志刚, 杨欣悦, 孙晨, 等. 成都地区夏季城市热岛变化及其与城市发展的关系 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12 (4): 322-331.
- [35] WEDER D, SCHAEPMAN-STRUB G, ECKER K. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using landsat NDVI phenology [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 447-460.
- [36] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27 (14): 3025-3033.
- [37] 杨山. 发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例 [J]. 地理学报, 2000, 55 (6): 671-678.
- [38] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法 [J]. 遥感学报, 2003, 7 (1): 37-40.
- [39] POLYDOROS A, CARTALIS C. Use of earth observation based indices for the monitoring of built-up area features and dynamics in support of urban energy studies [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 98: 92-99.
- [40] CHEN X, ZHANG Y P. Impacts of urban surface characteristics on spatiotemporal pattern of land surface temperature in Kunming of China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 87-99.
- [41] XU H Q. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33 (11): 1150-1153.
- [42] SUN R H, CHEN L D. How can urban water bodies be designed for climate adaptation? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105 (1-2): 27-33.
- [43] DU H Y, SONG X J, HONG J, *et al.* Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 31-38.
- [44] THEEUWES N E, SOLCEROVA A, STEENEVELD G J. Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (16): 8881-8896.
- [45] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 584-585: 1040-1055.
- [46] VIDRIH B, MEDVED S. Multiparametric model of urban park cooling island [J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2013, 12 (2): 220-229.
- [47] CHANG C, LI M H, CHANG S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80 (4): 386-395.
- [48] HAMADA S, OHTA T, UFUG J, *et al.* Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2010, 9 (1): 15-24.
- [49] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (2): 636-642.
- [50] 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.
- [51] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究 [J]. 中国园林, 2004, 20 (1): 72-75.
- [52] 刘娇妹, 李树华, 杨志峰. 北京公园绿地夏季温湿效应 [J]. 生态学杂志, 2008, 27 (11): 1972-1978.
- [53] 杜红玉. 特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018.

(下转第 87 页)