doi: 10.6046/zrzyyg.2020393

引用格式: 王美雅,徐涵秋. 中外超大城市热岛效应变化对比研究[J]. 自然资源遥感,2021,33(4):200-208. (Wang MY,Xu H Q. A comparative study on the changes in heat island effect in Chinese and foreign megacities[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):200-208.)

中外超大城市热岛效应变化对比研究

王美雅1,徐涵秋2

(1. 闽南师范大学历史地理学院,漳州 363000; 2. 福州大学环境与资源学院,福州大学遥感信息 工程研究所,福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室,福州 350116)

摘要:快速城市化形成超大城市导致地表覆盖快速变化,改变地表热平衡,使得城市热环境剧烈变化。以1990s, 2000s 和 2015 年这 3 个时期为研究时相,选取中外 6 个典型超大城市(北京、上海、广州、伦敦、纽约和东京)为研究 对象,多时相 Landsat 遥感影像为主要数据源,进行城市热环境变化对比及成因分析。利用普适性单通道算法反演 各城市地表温度,计算城市热岛比例指数(urban heat island ratio index,URI)来定量对比研究期间各城市热岛效应 时空变化。城市热岛效应对比研究结果表明,1990s—2015 年间,北京、上海和东京的 URI 呈总体上升趋势,广州、伦敦和纽约的 URI 呈总体下降趋势。到 2015 年,东京城市热岛效应最严重(URI = 0.630),其次是北京、上海、纽约 和广州,分别为0.617,0.594,0.555 和 0.530,伦敦的 URI 指数最小为 0.433。整个研究期间,北京、上海、广州和东 京等超大城市均有较大幅度扩张,建成区面积均增加 500 km²以上,不透水面面积增加 370 km²以上,不断向外蔓延 并占用生态用地,加上城市组团间无法形成良好的绿化分隔带,造成城市地表温度等级大幅上升,尤其是新城区热 岛效应增强显著;而在老城区通过旧城改造,热环境得到显著改善。伦敦和纽约城市无明显扩张,地表温度变化幅 度较小。在今后城市建设中,需注重生态理念,优化城市地表空间格局,提高生态用地效益。

关键词:超大城市;城市热环境;热岛比例指数;遥感;地表景观格局

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097 - 034X(2021)04 - 0200 - 09

0 引言

伴随着城市快速扩张,城市下垫面土地覆盖急 剧变化,改变了城市地表热量平衡,进而导致城市热 岛加剧,还会影响到区域气候过程^[1-3]。超大城市 具有"超大性"。其建筑物和道路等不透水面分布 规模大且密集,加上大量人为活动产生了大体量的 水和热等城市代谢,这种"超大性"对城市生态系统 产生了强大外力干扰,其产生的城市热岛问题远大 于其他中小城市和乡村地区。研究对比超大城市热 环境时空演化差异,有助于提高国内外超大城市规 划建设模式与地表辐射能量平衡互馈关系内在机理 的认知能力,为控制城市发展规模及城市生态规划 与整治等提供科学参考。

遥感技术具有覆盖面广、长时序、处理速度快等 优势,利用遥感技术来监测城市热岛效应,可以克服 传统地面观测站点资料数据极其有限的问题,实现 海量"面"数据的获取。此外,为了衡量城市热环境 长时间变化,有必要在全球、区域和城市范围内提供 准确、一致的数据。多时相、多光谱、多平台的遥感 卫星影像能够更综合、准确地反映出下垫面的地物 光谱信息和热信息等状况^[4]。

快速城市化导致城市热环境变化^[5-6]。一方 面,城市人口的大幅增加,城市规模不断扩大,能耗 需求剧增,人为温室气体排放总量持续增加。另一 方面,城市化过程中大量的建筑物、水泥路等不透水 面取代了植被、水体等生态用地,导致地表蒸腾明显 减少,显热表面比例升高而潜热表面比例降低,促使 城市热岛效应日益严峻^[7]。而城市热岛又使得城 市温度一直居高不下,夏季的长时间高温导致降温 需求增大,空调的大量使用使得能耗增加,巨大的能 耗又反过来加剧城市热岛效应,形成了一个恶性循 环。众多学者围绕城市热环境变化进行研究分析。 Weng 等^[8]利用线性光谱混合模型提取植被和不透

通信作者: 徐涵秋(1955 -),男,博士,教授,主要从事环境与资源遥感研究。Email: hxu@fzu.edu.cn。

收稿日期: 2020-12-08;修订日期: 2021-04-07

基金项目:国家重点研发计划专项课题"大尺度全球变化数据产品快速生成方法"(编号:2016YFA0600302)、福建省创新战略研究项目"厦漳泉都市区生态质量遥感评价与地表空间格局优化研究"(编号:2020R0155)及闽南师范大学校长基金项目"全球气候变化视角下的城市热环境遥感动态监测"(编号:KJ19013)共同资助。

第一作者:王美雅(1991-),女,博士,副教授,主要从事环境与资源遥感研究。Email: 286097145@qq. com。

水面等专题影像,与地表温度进行综合分析发现,城 市地物的空间排列以及城市在扩展时 LULC 的变化 是导致地表温度产生变化的主要原因: Zheng 等^[9] 则在利用 Moran'I 指数对凤凰城的地表温度和 LULC 类型的相关性研究中发现,相对于城市建筑 物的空间格局,其外立面不同涂料的区别对地表温 度的影响更大,且夜间的正相关性更高; Chen 等^[10] 运用 Landsat 影像反演广州城市地表温度,进一步计 算城市热变异区域,并采用多种景观格局指数分析 城市热变异区的特征,结果表明城市地物组成对城 市热变异区的影响最大,地表景观空间格局也会影 响城市热变异区: Kotharkar 等^[11]分析印度那格浦 尔市局地气候分区(local climate zones, LCZ)的热 岛情况,结果表明冬季建筑用地气候区内的城市热 岛强度介于1.76~4.09 ℃之间,城区中紧凑型低层 LCZs 区比城市内部其他主要 LCZs 区的气候暖和。

改革开放以来,中国的城市化进入了快速发展 阶段,城市化水平由 7.92% 提高到 56.10%^[12]。其 中,北京、上海、广州的人口数排名均已跃居世界前 25 位^[13]。于此同时,1978—2014 年,中国城市建成 区面积呈指数增长,由 1981 年的 7 438 km²增长到 2014 年的 49 773 km²,增长了近 6.69 倍^[14],近 40 a,中国城市快速扩张,这一城市变化研究条件是 全球其他国家和地区的城市所不具备的,因此,选取 国内的3个超大城市(北京、上海和广州)与3个国 际典型超大城市(伦敦、纽约、东京)进行对比,研究 其城市"超大性"与城市热环境的互动作用机理,能 为未来生态城市建设提供宝贵建议。

1 研究区概况

根据 2014 年中国国务院发布的城市规模划分标准,本文选取城区常住人口超过 1 000 万的中外 6 个典型超大城市(北京、上海、广州、伦敦、纽约和东 京)。北京、上海、广州是中国城市规模排名前 3 的 超大城市,伦敦、纽约和东京是城市规模居世界前列 的 3 个超大城市,分别分布在欧洲、美洲和亚洲。6 个超大城市的城市规模相当,人口众多,国内生产总 值高,但城市发展轨迹和城市空间格局显现不同的 特征,具有对比性。由于中、美、英、日各国的行政区 划差异较大,本文以 6 个城市 2015 年的建成区外扩 5 km 缓冲区的范围作为研究区(图 1),以此划定具有 对比性的城市边界^[15]。据此获得的北京、上海、广州、 伦敦、纽约和东京的研究区面积分别为 2 776.52 km², 3 276.69 km²,1 750.33 km²,2 503.20 km²,2 341.11 km² 和 5 992.02 km²。



Fig. 1 Landsat images of the study area

- 2 研究方法
- 2.1 地表温度反演

遥感卫星数据源的一致保证了研究数据的可靠

性,因此本文全部选择 Landsat 系列卫星影像,如表 1 所示。由于所选遥感影像时相并不完全一致,为 了后续行文表达的简练,本文将各城市的研究时相 按时间正序分别依次命名为 1990s,2000s 和 2015 年。其他辅助数据有 1990s,2000s 和 2015 年 6 个 超大城市建成区边界矢量图。采用 Chander 等^[16] 和 Chavez^[17]的模型和参数以及 Landsat 网站提供的 公式和参数分别对 Landsat5, Landsat7 和 Landsat8 影像进行辐射校正,将影像的亮度值转换为传感器 处反射率。

表 1 研究选用的 Landsat 影像信息 Tab. 1 Landsat images information of the study area

城市	传感器类型	影像获取日期	城市	传感器类型	影像获取日期
	ТМ	1989 – 08 – 14		TM	1990 - 08 - 03
北京	TM	1999 – 08 – 10	伦敦	ETM+	1999 - 09 - 05
	OLI/TIRS	2015 - 08 - 22		OLI/TIRS	2015 - 10 - 02
	ТМ	1989 – 08 – 11		TM	1991 – 08 – 17
上海	TM	2002 - 07 - 30	纽约	TM	2001 - 07 - 27
	OLI/TIRS	2015 - 08 - 03		OLI/TIRS	2015 - 08 - 26
	TM	1991 - 09 - 14		TM	1987 - 07 - 24
广州	ТМ	2003 - 10 - 07	东京	ETM+	2001 - 09 - 24
	OLI/TIRS	2015 - 10 - 18		OLI/TIRS	2015 - 10 - 09

地表温度反演采用 Jiménez – Muñoz 等^[18-20]提 出的单通道算法, Landsat5 和 Landsat7 影像地表温 度反演分别采用的是 TM 和 ETM+第6 波段, Landsat8 采用 TIRS 第10 波段。根据 Chander 等^[16] 和 Chavez^[17]的模型和参数以及 Landsat 网站提供的公 式和参数,将影像的亮度值转换成大气顶部的光谱 辐射值。进一步通过公式转换为亮温(T_{sensor}),最后 反演出地表温度(*LST*),即

$$T_{\text{sensor}} = K_2 / \ln(K_1 / L_{\text{sensor}} + 1)$$
 , (1)

$$LST = \gamma \left[\varepsilon^{-1} (\psi_1 L_{\text{sensor}} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta , (2)$$

式中: T_{sensor} 为传感器处亮温值; $K_1 \cap K_2$ 为热红外波 段的定标常数; L_{sensor} 为热红外波段的辐射值; $\gamma \cap \delta$ 为基于 Planck 函数的 2 个参数; ε 为地表比辐射 率; ψ_1, ψ_2, ψ_3 为大气水汽含量的函数。

2.2 城市热岛比例指数

城市热岛比例指数(urban heat island ratio index,URI)是一种量化城市热岛效应的方法^[21],该指 数考虑了受热岛影响的高等级温区在城市建成区内 的占比,同时根据温度等级对热岛效应的贡献程度 自动赋予权重,其强度值可以反映城市热岛在区域 水平上的累积分布特征,已得到广泛应用^[22-24]。由 于影像的季相差异和传感器差异,很难直接采用反 演得到的绝对温度值来进行不同年份城市热岛效应 之间的对比。为了消除差异导致的误差,将所研究 6个城市3个时相反演求得的地表温度值进行归一 化处理,取值统一在[0,1]之间。其计算公式为:

$$LST' = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} , \qquad (3)$$

$$URI = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^{n} \omega_i p_i \quad , \tag{4}$$

式中: LST'为正规化后地表温度值; LST_{min}和 LST_{max} 分别为地表温度的最小值和最大值; m 为所划分的 温度等级数; i 为城区温度高于郊区温度的第 i 个 温度等级; n 为城区高于郊区的温度等级数; ω_i 为 权重值,取第 i 级的级值; p_i 为第 i 级所占城市建成 区面积的百分比。URI 值介于 0~1 之间, URI 等于 1 表示城市建成区内全部由最高温度等级的斑块组 成; URI 等于 0 表示不存在热岛效应。本研究将地 表温度分为 7 级, 因此 m = 7, 分别为低温、较低温、 次中温、中温、次高温、高温、特高温。6 个城市各研 究时相城市建成区边界范围内主要由次高温、高温 和特高温这 3 个温度等级组成, 因此 n 为 3。

2.3 土地覆盖分类

采用随机森林(random forests, RF)分类算法^[25] 提取植被、水体、不透水面和其他用地(裸土)等4 种地表覆盖类型。RF 算法是一种基于决策树的集 成学习算法,逐渐被应用于遥感数据信息提取研究 中^[26-27]。RF 算法的 2 个参数: 生成决策树数量和 用于测试的特征数目参数分别设置为500和2。对 3个研究时期6个超大城市的分类结果与同期 Google Earth 高分辨率影像进行对比,采用随机抽样 的方法在每幅分类影像中随机选取 300 个验证点, 然后进行人机交互精度验证[28](由于6个城市 1990s 的影像无同期的 Google Earth 高分辨率影像, 因此将分类结果与原影像进行对比)。验证结果表 明,各时相的提取总精度均高于85%,各地类的生 产者精度和用户精度基本都高于 80%, Kappa 系数 也均高于0.85,这说明分类结果比较理想,能很好 地满足研究需求。

3 研究结果

3.1 城市热岛强度时空变化对比分析

6个超大城市的城市热岛比例指数 URI 反演结 果如图 2 所示。结果表明(表 2),1990s—2015 年 间,6个城市的热岛效应呈现出 2 种不同的变化趋 势:①北京、上海和东京的 URI 总体呈上升趋势,表 明这 3 个城市的热岛现象有所加剧,其中北京的 URI 上升幅度最大,增加了 0.037,说明北京的热岛 强度增加最为剧烈。从分时段趋势来看,北京和上 海的 URI 指标呈先有所下降,后又增加的变化过 程,1990s—2000s 间,2 个城市热岛效应得到缓解, URI 分别下降了 0.041 和 0.069; 2000s—2015 年间 热岛效应又显著增强,URI 均增加了 0.078; 东京的 URI 指标则经历了先升后降的趋势,从 1990s 的 0.599 上升到 2000s 的 0.664,后又下降到 2015 年 的0.630,表明研究期间东京热岛效应得到控制。 ②广州、伦敦和纽约的 URI 总体呈下降趋势,其中 纽约的 URI 下降幅度最大,从 1990s 的 0.641 降低 至2015年的0.555,降低幅度为0.086,城市热岛得 到较大程度的缓解;广州从分时段变化来看,URI 指标则经历了先升后降的变化过程,1990s-2000s 间,广州热岛效应显著加剧, URI 指标从 1990s 的 0.589 增加到 2000s 的 0.608, 而后明显下降到 2015 年的0.530,这表明广州在研究后期热岛效应得到 有效控制,热环境状况有所好转;伦敦的 URI 指标 在各研究时段的变化幅度最小,从1990s的0.449 下降到 2000s 的 0.421, 后又略微上升到 2015 年的 0.433,其城市热岛得到有效控制。



	ig. 2	LST	grade	map i	in	built	– up	area	of	the	six	megaciti
--	-------	-----	-------	-------	----	-------	------	------	----	-----	-----	----------

	表 2	地表温度等级和 URI 统计
Tab. 2	Statistics	table of different LST grade and URI

	北京						上海					
LST 等级	199	0s	200	0s	2015	5 年	199	00s	2000s		2015 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低温(1)	0.02	0.00	0.09	0.01	0.03	0.00	0.94	0.29	1.57	0.19	18.20	0.95
较低温(2)	0.09	0.02	5.15	0.73	7.88	0.64	12.31	3.73	13.41	1.62	35.20	1.83
次中温(3)	41.52	8.13	45.57	6.47	46.43	3.75	14.47	4.39	40.51	4.88	139.34	7.26
中温(4)	82.03	16.06	158.17	22.47	184.35	14.87	61.19	18.55	207.84	25.06	286.39	14.92
次高温(5)	256.32	50.18	327.66	46.55	682.14	55.03	107.08	32.46	422.45	50.94	805.33	41.97
高温(6)	124.62	24.40	154.69	21.97	287.86	23.22	122.24	37.06	123.27	14.86	494.04	25.75
特高温(7)	6.17	1.21	12.60	1.79	30.87	2.49	11.63	3.52	20.33	2.45	140.34	7.31
建成区面	510	78	3 703.92 1 239.56		56	320	88	820	37	1 019 02		
积/km ²	510.78 705.92		1 25.	1 239.30 329.88		829.37		1 710.75				
URI	0.	580	0.539 0.617		0.	. 585	0.	. 516	(). 594		
			<u>ب</u>	州					伦	敦		
LST 等级	199	0s	200	0s	2015	5年	199	00s	200	00s	2015	5 年
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低温(1)	0.00	0.00	0.11	0.04	7.88	1.18	9.78	0.80	22.27	1.82	8.86	0.72
较低温(2)	2.11	1.87	7.14	2.32	17.60	2.63	20.47	1.68	26.48	2.17	33.25	2.70
次中温(3)	6.53	5.79	15.59	5.06	52.38	7.82	102.26	8.39	97.72	7.99	121.32	9.87
中温(4)	18.49	16.39	46.35	15.05	123.37	18.42	370.25	30.38	398.43	32.58	362.63	29.49
次高温(5)	51.57	45.72	132.80	43.11	336.41	50.24	481.19	39.48	490.36	40.10	513.84	41.79
高温(6)	31.12	27.59	94.44	30.66	122.01	18.22	221.91	18.21	162.46	13.29	169.06	13.75
特高温(7)	2.98	2.64	11.58	3.76	9.90	1.48	12.94	1.06	25.17	2.06	20.53	1.67
建成区面 积/km ²	112.	. 80	308	.01	669	. 66	1 218	3.90	1 222	2.88	1 229	9.48
URI	0.	589	0.	608	0.	. 530	(). 449	(). 421	(). 433

	2021	年

												(续表)	
		纽约						东京					
LST 等级	1990s		2000s		2015 年		199	1990s		2000s		2015 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%							
低温(1)	20.20	2.12	22.22	2.32	20.78	2.16	16.41	0.69	3.92	0.13	0.97	0.03	
较低温(2)	19.41	2.04	18.18	1.90	24.13	2.50	49.43	2.09	60.96	2.09	41.57	1.31	
次中温(3)	37.80	3.96	46.57	4.86	70.60	7.32	102.15	4.32	71.75	2.46	190.71	6.03	
中温(4)	79.16	8.30	117.96	12.31	170.02	17.64	353.45	14.96	400.64	13.72	406.91	12.87	
次高温(5)	522.58	54.78	432.98	45.17	349.22	36.23	1 151.84	48.76	1 114.60	38.16	1 208.33	38.23	
高温(6)	255.08	26.74	300.69	31.37	306.32	31.78	678.44	28.72	1 218.34	41.71	1 279.83	40.49	
特高温(7)	19.60	2.05	19.73	2.06	22.63	2.35	10.47	0.44	97.64	3.34	31.71	1.00	
建成区面 积/km ²	953	. 95	958	. 50	963	. 90	2 362	2.24	2 920). 65	3 16	0.92	
URI	0	. 641	0	. 612	0	. 555	(). 599	(). 664	(0.630	

3.2 地表温度分级演化时空特征

为了凸显研究期间6个超大城市地表温度等级的变化和迁移特征,定位并分析温度等级大幅跃迁

的典型区域,本文将多时相地表温度等级分布做叠 加分析并计算差值获得了研究期间地表温度等级变 化(图3和表3)。



Fig. 3	LST grade char	ge map in th	e study area	from 1990s	to 2015

	表 3	研究区地表温度等级变化统计
Tab. 3	LST grade cha	ange table in the study area from 1990s to 2015
	北古	上海

亦化桂刀	亦化笙尔		北京			上海			广州			
文化旧几	文化守纵	面积/km ²	比例/%	总比例/%	面积/km ²	比例/%	总比例/%	面积/km ²	比例/%	总比例/%		
	-4	0.75	0.03		0.90	0.03		0.56	0.03			
吃爪	- 3	8.23	0.30	14 07	8.49	0.26	0 76	5.55	0.32	10.02		
阿尔	-2	56.88	2.05	14.27	29.87	0.91	8.70	50.72	2.90	19.02		
	- 1	330.45	11.90		247.83	7.56		276.00	15.77			
不变	0	916.48	33.01	33.01	628.06	19.17	19.17	467.18	26.69	26.69		
	1	834.16	30.04		807.13	24.63		416.13	23.77			
	2	503.33	18.13		653.39	19.94		301.23	17.21			
升高 3 4 5	3	114.77	4.13	50 70	550.19	16.79	72 07	168.48	9.63	54 20		
	4	11.16	0.40	32.72	265.36	8.10	72.07	55.48	3.17	54.29		
	5	0.30	0.01		84.80	2.59		8.60	0.49			
	6	0.00	0.00		0.67	0.02		0.37	0.02			
合计	_	2 776.52	100.00	100.00	3 276.69	100.00	100.00	1 750.33	100.00	100.00		
			伦敦			纽约			东京			
	变化等级	面积/km ²	伦敦 比例/%	总比例/%	面积/km ²	纽约 比例/%	总比例/%	面积/km ²	东京 比例/%	总比例/%		
	变化等级 -4	面积/km ² 8.45	伦敦 比例/% 0.34	总比例/%	面积/km ² 0.42	纽约 比例/% 0.02	总比例/%	面积/km ² 2.65	东京 比例/% 0.05	总比例/%		
	变化等级 -4 -3	面积/km ² 8.45 19.78	伦敦 比例/% 0.34 0.79	总比例/%	面积/km ² 0.42 14.35	纽约 比例/% 0.02 0.61	总比例/%	面积/km ² 2.65 15.79	东京 比例/% 0.05 0.26	总比例/%		
降低	<u>变化等级</u> -4 -3 -2	面积/km ² 8.45 19.78 74.93	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99	总比例/% 26.47	面积/km ² 0.42 14.35 107.57	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59	总比例/% 28.04	面积/km ² 2.65 15.79 231.44	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86	总比例/%		
降低	<u>变化等级</u> -4 -3 -2 -1	<u>面积/km²</u> 8.45 19.78 74.93 559.35	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35	总比例/% 26.47	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82	总比例/% 28.04	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95	总比例/% 14.12		
降低 不变	<u>変化等级</u> -4 -3 -2 -1 0	<u>面积/km²</u> 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94	总比例/% 26.47 50.94	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55	总比例/% 28.04 56.55	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53	总比例/% 14.12 50.53		
降低 不变	<u>変化等级</u> -4 -3 -2 -1 0 1	<u>面积/km²</u> 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04 466.34	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63	总比例/% 26.47 50.94	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31	总比例/% 28.04 56.55	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34	总比例/% 14.12 50.53		
降低 不变	变化等级 -4 -3 -2 -1 0 1 2	面积/km ² 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04 466.34 69.20	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63 2.76	总比例/% 26.47 50.94	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88 21.70	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31 0.93	总比例/% 28.04 56.55	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82 553.93	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34 9.24	总比例/% 14.12 50.53		
降低 不变	<u>変化等级</u> -4 -3 -2 -1 0 1 2 3	面积/km ² 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04 466.34 69.20 26.23	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63 2.76 1.05	总比例/% 26.47 50.94	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88 21.70 3.21	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31 0.93 0.14	总比例/% 28.04 56.55	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82 553.93 139.32	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34 9.24 2.33	总比例/% 14.12 50.53		
降低 不变 升高	<u>変化等级</u> -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4	面积/km ² 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04 466.34 69.20 26.23 3.48	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63 2.76 1.05 0.14	总比例/% 26.47 50.94 22.59	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88 21.70 3.21 0.63	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31 0.93 0.14 0.03	总比例/% 28.04 56.55 15.41	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82 553.93 139.32 22.49	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34 9.24 2.33 0.38	总比例/% 14.12 50.53 35.35		
降低 不变 升高	<u>変化等级</u> -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5	<u>面积/km²</u> 8.45 19.78 74.93 559.35 1275.04 466.34 69.20 26.23 3.48 0.34	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63 2.76 1.05 0.14 0.01	总比例/% 26.47 50.94 22.59	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88 21.70 3.21 0.63 0.06	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31 0.93 0.14 0.03 0.00	总比例/% 28.04 56.55 15.41	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82 553.93 139.32 22.49 3.54	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34 9.24 2.33 0.38 0.06	总比例/% 14.12 50.53 35.35		
降低 不变 升高	<u></u> 変化等级 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6	<u>面积/km²</u> 8.45 19.78 74.93 559.35 1 275.04 466.34 69.20 26.23 3.48 0.34 0.07	伦敦 比例/% 0.34 0.79 2.99 22.35 50.94 18.63 2.76 1.05 0.14 0.01 0.00	总比例/% 26.47 50.94 22.59	面积/km ² 0.42 14.35 107.57 534.30 1 324.00 334.88 21.70 3.21 0.63 0.06 0.00	纽约 比例/% 0.02 0.61 4.59 22.82 56.55 14.31 0.93 0.14 0.03 0.00 0.00	总比例/% 28.04 56.55 15.41	面积/km ² 2.65 15.79 231.44 596.23 3 027.80 1 398.82 553.93 139.32 22.49 3.54 0.01	东京 比例/% 0.05 0.26 3.86 9.95 50.53 23.34 9.24 2.33 0.38 0.06 0.00	总比例/% 14.12 50.53 35.35		

结果表明:

1)新城区热岛效应增强显著。国内的3个超 大城市的地表温度等级变化图中(图3).代表温度 等级升高的黄、橙、红色斑块占比都远高于代表温度 等级降低的蓝色斑块,说明在研究期内这3个城市 均总体处于升温态势。其中,上海有72.07%的区域 地表温度等级有不同程度的升高,升温比例为3城 最大,降温比例为3 城最小(表3),其城市热环境的 恶化程度最严重。北京和广州研究区内的变化情 况与上海类似,大部分区域温度等级升高,分别占 研究区的 52.72% 和 54.29%, 只有约 14.27% 和 19.02%的面积温度降低,城市热环境形势也不容乐 观。整个研究期间,广州城市总体呈升温态势而 URI 值下降,说明广州建成区地表温度总体下降,即 广州城市热岛效应有所减缓,但其周边郊区升温显 著,如白云新城,导致广州城市总体仍呈现升温态 势。北京和上海周边新建成区的地表温度等级也都

有较为明显的升高,如虹桥商务片区、亦庄新城等, 温度等级大都上升了2级以上。这些区域(表4 (a)--(c))在1990s均由水体、植被和极少量建筑 用地所覆盖,地表温度等级以低温和较低温为主。 但在 2015 年,变成"北京亦庄经济技术开发区", "上海南翔产业园区"和"广州萝岗新城",曾经的湿 地、植被被大量不透水面所覆盖,工业业态和人口集 聚导致了人为热源增加,地表温度等级大幅上升,城 市热岛效应急剧恶化。东京温度升高区域比例(35. 35%)则高于其温度降低区域比例(14.12%)(表3), 说明在研究期内东京城市总体也处于升温态势。东 京的升温区主要分布在西南部八王子、青梅、町田等 新城区域,东部的千叶地区和北部的川越、浦和一大 宫和南部的滨海副中心(表4(d)-(e)),这些区域 以内部填充为主,滨海副中心升温区域主要对应填 海建设用地区域。

表 4 北京、上海、广州和东京地表温度等级跃迁典型区 Tab. 4 LST level transition table in typical areas of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Tokyo from 1990s to 2015

				地	点			
时间	(a)北京大	(b)上海宝	(c)广州黄	(d)东京	(e)东京	(f)北京朝	(g)上海静	(h)广州海珠
	兴亦庄片区	山南翔片区	埔萝岗片区	千叶地区	滨海副中心	阳国贸片区	安苏河湾区域	桥南广场地区
1990s (B4(R), B3(G), B2(B))								
2015年 (B5(R), B4(G), B3(B))			49 15					
1990s— 2015 年 地表温度 等级变化	11.24							
图例			地表 -4 -3 -2	表温度等级变化值 -101234	5 6 [↑] ^N 0	2 km		

2)老城区城市热岛效应缓解:在城市高温区域 大幅扩张的背景下(图3),北京、上海和广州中心老 城区却不约而同地出现了温度等级下降的趋势。由 表4(f)—(h)可以看出,北京的东城区和西城区、上 海静安区和普陀区、广州越秀区和海珠区等均不同 程度地出现了代表温度等级下降的蓝色斑块,在周 围红黄色调斑块包围下尤为明显。这3个区域在 1990s都是所在城市人口数量大、建筑物密度高、植 被覆盖少的居住区或商业区,也是所在城市热岛效 应最为严重的区域之一。得益于城市旧城改造和产 业结构调整等措施,到2015年,这些区域均大量增 加了代表植被的红色斑块,且区域内通风廊道明显 增多,建筑物密度降低,使得地表温度向低等级跃 迁,城市热岛效应缓解明显,热环境得到显著改善。

总体而言,在整个研究时期,国外3个超大城市 的地表温度变化幅度小于国内3个超大城市。伦敦 和纽约地表温度等级变化幅度超过2级的仅占不到 8%,说明在整个研究时期,这2个城市的城市地表 温度变化幅度较小。北京、上海、广州和东京等城市 总体均处于升温态势,新城区热岛效应增强显著; 而在老城区通过旧城改造,城市热岛效应得到缓解, 热环境得到显著改善。

3.3 地表景观格局演化对城市热环境影响

6个超大城市不同的扩张模式和地表格局演化

导致了其城市热环境变化的差异。1990s-2015 年,中国属于城市化快速发展阶段,北京、上海和广 州等城市快速扩张,建成区面积涨幅超过 500 km², 变化速率为 23.2~61.1 km²/a 不等(表 5)。城市 大面积开发和建设造成原本以农田、植被为主的原 生自然下垫面类型被剧烈转变,不透水面面积增加 370 km²以上,变化速率高于 15.8 km²/a; 对应的植 被用地大量缩减,植被面积减少330 km²以上,减少 速率超过14.0 km²/a(表5)。此外,其规划所提出 的"多中心多组团"布局模式未得到很好的实施, 组团间无法形成良好的绿化分隔带,使得城市不 透水面向外蔓延扩展的趋势未得到有效遏制,加 上城市中心区功能不断聚集,新城区建设区域由 非热岛区转变为新的城市热岛中心,造成地表温 度等级大幅上升,地表温度升高区域的比例高达 54.29% ~72.07%

表 5 6 个超大城市建成区和土地覆盖面积及比例变化 Tab. 5 Urban built – up area and land cover change of the six megacities from 1990s to 2015

	北	京	L	二海	广州		
土地覆 盖类型	变化 面积/ km ²	变化 速率/ (km ² •a ⁻¹)	变化 面积/ km ²	变化 速率/ (km ² ·a ⁻¹)	变化 面积/ km ² (变化 速率/ km ² ·a ⁻¹)	
植被	-736.06	-28.3 -	-1 401.1	9 - 53.9	- 336.23	-14.0	
不透水面	785.24	30.2	1 408.9	54.2	379.21	15.8	
建成区	728.78	28.0	1 589.0	05 61.1	556.86	23.2	
	伦	敦	4	田约	东	京	
土地覆 盖类型	变化 面积/ km ²	变化 速率/ (km ² •a ⁻¹)	变化 面积⁄ km ²	变化 速率/ (km ² ·a ⁻¹)	变化 面积/ km ² (变化 速率⁄ km ² •a ⁻¹)	
植被	-25.42	-1.0	-5.05	-0.2	-765.30	-27.3	
不透水面	29.04	1.2	21.13	0.9	815.20	29.1	
建成区	10 49	0.4	0 0/	0.4	708 68	28 5	

而国外3个超大城市(伦敦、纽约和东京)在相 同研究期间中,东京建成区面积在前期也大幅增加了 798.68 km²(表5)。城市土地覆盖变化剧烈,不透水 面面积增加815.20 km²,对应的植被用地大量缩减 765.30 km²。其城市规划目标为从"单核中心结构" 向"多核中心结构"转变,但城市居住用地以独栋低 层为主,不透水面分布密集目连通性高,1990s-2000s间,城市西南部和南部有所扩张,使得城市地 表温度升温区比例也达到了 35.35%。伦敦和纽约 在研究期内已进入城市化后期,城市空间无明显扩 张,建成区面积趋于稳定,增幅均不超过11 km²,变化 速率仅为0.4 km²/a(表5),土地覆盖则整体变化缓 慢。在规划上,伦敦建立多城市中心组团模式,城 市形成有机的城乡间隔格局,并通过大片绿地来 分割组团,避免密集连片发展,城市绿地生态效益 较好;纽约通过城市功能区的有序划分形成了不 透水面沿城乡梯度上的"高 - 中 - 低"格局,加上 研究期间这 2 个城市无明显扩张,使得其地表温度 等级变化较小,地表温度升高区域的比例(14.40% ~ 22.59%)小于其他超大城市。

4 结论

本文以中外6个典型超大城市(北京、上海、广 州、伦敦、纽约和东京)为研究对象,采用单通道算 法反演这6个超大城市的地表温度,计算城市热岛 比例指数 URI,定量对比6个超大城市的热岛效应 变化和差异。在此基础上,分析国内外超大城市土 地覆盖变化、城市扩张和规划政策等差异对城市热 环境演化的不同影响。

1)在研究期间,6个城市的热岛效应呈现出不同的变化趋势。北京、上海和东京的URI总体呈上升趋势,表明这3个城市的热岛现象加剧。广州、伦敦和纽约的URI总体呈下降趋势,表明这3个城市的城市热岛有所缓解。到2015年,东京研究区的URI指数最高(0.630),其城市热岛效应最为严重, 其次是北京、上海、纽约和广州,分别为0.617, 0.594,0.555和0.530,伦敦的URI指数最小为0.433。

2)整个研究期间,伦敦和纽约的地表温度变化 幅度较小。北京、上海、广州和东京等城市总体均处 于升温态势,新城区热岛效应增强显著;而在老城 区通过旧城改造,热环境得到显著改善。

3)6个超大城市不同的城市布局和扩张模式导 致其城市热环境变化的差异。在研究期间,北京、上 海、广州和东京均有较大幅度扩张,占用生态用地, 加上所提出的"多中心多组团"布局模式未得到很 好实施,组团间无法形成良好的绿化分隔带,造成地 表温度等级大幅上升。而同期伦敦建立多城市中心 组团模式;纽约通过城市功能区的有序划分形成了 不透水面沿城乡梯度上的"高-中-低"格局,加上 研究期间这2个城市无明显扩张,使得其地表温度 等级变化较小。

在城市建设中,需注重生态理念的实际贯彻和 实施,通过对旧城区进行重建与提升,挖掘用地潜 力;优化城市地表空间格局,打破大面积建设用地 斑块的聚集,提高生态用地效益,可以改善城市生态 环境质量。

参考文献(References):

[1] 匡文慧,杨天荣,刘爱琳,等.城市地表覆盖结构组分与热环境 调控模型(EcoCity)研究——以北京城市为例[J].中国科学 (地球科学),2017,47(7):847-859.

Kuang W H, Yang T R, Liu A L, et al. An EcoCity model for regulating urban land cover structure and thermal environment: Taking Beijing as an example[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 47 (7):847-859.

- [2] Xu H Q, Wang M Y, Shi T T, et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI) [J]. Ecological Indicators, 2018, 93:730 – 740.
- [3] Croft White M V, Cvetkovic M, Rokitnicki Wojcik D, et al. A shoreline divided: Twelve – year water quality and land cover trends in Lake Ontario coastal wetlands[J]. Journal of Great Lakes Research, 2017, 43(6):1005 – 1015.
- [4] United Nations. State of the world population 2014 the power of 1.8 billion: Adolescents, youth and the transformation of the future [EB/OL]. https://reliefweb. int/report/world/state – world – population – 2014 – power – 18 – billion – adolescents – youth – and – transformation.
- [5] Meng F, Shan B Y, Liu M. Remote sensing evaluation of the relationship between urban heat islands and urban biophysical descriptors in Jinan, China [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1):083693.
- [6] 葛荣风,王京丽,张力小,等.北京市城市化进程中热环境响应
 [J].生态学报,2016,36(19):6040-6049.
 Ge R F, Wang J L, Zhang L X, et al. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(19):6040-6049.
- [7] Feyisa G L, Meilby H, Jenerette G D, et al. Locally optimized separability enhancement indices for urban land cover mapping: Exploring thermal environmental consequences of rapid urbanization in Addis Ababa, Ethiopia[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175:14-31.
- [8] Weng Q H, Lu D S. A sub pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(1):68 – 83.
- [9] Zheng B J, Myint S W, Fan C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 130:104 – 111.
- [10] Chen Y J, Yu S X. Impacts of urban landscape patterns on urban thermal variations in Guangzhou, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54:65 – 71.
- [11] Kotharkar R, Bagade A. Evaluating urban heat island in the critical local climate zones of an Indian city [J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 169:92 – 104.
- [12] 中国国家统计局.中国统计年鉴(2015 年)[M].北京:中国统 计出版社,2016.
 National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook
 [M]. Beijing; China Statistics Press, 2016.
- [13] United Nations. World population prospects: The 2018 revision [EB/OL]. https://population. un. org/wup/Publications/.
- [14] 中国住房和城乡建设部.中国城市建设统计年鉴 2014[M].北 京:中国统计出版社,2015.

Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook[M]. Beijing; China Statistics Press, 2015.

- [15] Van de Voorde T, Jacquet W, Canters F. Mapping form and function in urban areas: An approach based on urban metrics and continuous impervious surface data [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(3):143-155.
- [16] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO - 1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5):893-903.
- [17] Charvz Jr P S. Image based atmospheric corrections revisited and revised [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9):1025 – 1036.
- [18] Jiménez Muñoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, et al. Revision of the single – channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal – infrared data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1):339 – 349.
- [19] Jiménez Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108 (D22):4688.
- [20] Jiménez Muñoz J C, Sobrino J A, Skokové D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat8 thermal infrared sensor data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10):1840 – 1843.
- [21] 徐涵秋,陈本清.不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛 变化中的处理方法[J].遥感技术与应用,2003,18(3):129-133.

Xu H Q, Chen B Q. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18 (3):129-133.

[22] 国家环保部. 生态环境状况评价技术规范(发布稿)[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
 Ministry of Ecology and Environment the People's Republic of

China. Technical criterion for ecosystem status evaluation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

- [23] 住房城乡建设部.城市生态建设环境绩效评估导则(试行)
 [M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
 Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Guidelines for performance assessment of urban ecological construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press,2015.
- [24] 樊智宇, 詹庆明, 刘慧民,等. 武汉市夏季城市热岛与不透水面 增温强度时空分布[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 226 – 235.

Fan Z Y, Zhan Q M, Liu H M, et al. Spatial – temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan [J]. Journal of Geo – Information Science, 2019,21(2):226-235.

- [25] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1):5 32.
- [26] Du P J, Samat A, Waske B, et al. Random forest and rotation forest for fully polarized SAR image classification using polarimetric and

spatial features[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2015,105:38 - 53.

[27] Padmanaban R, Bhowmik A K, Cabral P. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area[J]. ISPRS International Journal of Geo – Information, 2017, 6 (12); 401.

[28] Schneider A. Monitoring land cover change in urban and peri – urban areas using dense time stacks of Landsat satellite data and a data mining approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124;689 – 704.

A comparative study on the changes in heat island effect in Chinese and foreign megacities

WANG Meiya¹, XU Hanqiu²

(1. School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China; 2. College of Environment and Resources, Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion and Disaster Prevention, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Megacities have formed due to rapid urbanization. As a result, the surface cover has rapidly changed, which changes the heat balance of Earth's surface and induces drastic changes in the thermal environment in megacities. With six typical megacities (Beijing, Shanghai, Guangzhou, London, New York, and Tokyo) across the world as study objects and multi - temporal Landsat remote - sensing images of the 1990s, the 2000s, and 2015 as the main data sources, this study compares the changes in the thermal environment among the six megacities and analyzes their causes. For each of the megacities, the surface temperature was determined through reversion using the universal single - channel algorithm and the urban heat island ratio index (URI) was calculated to quantitatively compare the spatial - temporal changes in the heat island effect during the study period. The results are as follows. From the 1990s to 2015, the URI values of Beijing, Shanghai, and Tokyo showed an overall upward trend, and while that of Guangzhou, London, and New York showed an overall downward trend. In 2015, Tokyo suffered the most serious urban heat island effect (URI = 0.630), followed by Beijing, Shanghai, New York, and Guangzhou successively, of which the URI values were 0. 617, 0. 594, 0. 555, and 0. 530, respectively. In contrast, London had the smallest URI of 0.433. The megacities such as Beijing, Shanghai, Guangzhou, and Tokyo all considerably expanded throughout the study period. In these cities, the built - up areas and impervious surfaces increased by more than 500 km² and more than 370 km² on average, respectively in terms of area. They continuously spread outwards and occupied ecological land. Furthermore, green belts can not be formed between urban clusters. All these caused a significant increase in urban surface temperature and especially the significant aggravation of the heat island effect in new urban areas. In comparison, the thermal environment in the old urban areas was significantly improved through urban reconstruction. London and New York were not significantly expanded, where the surface temperature slightly changed. Therefore, it is necessary to pay attention to ecological philosophy, optimize the pattern of urban surface space, and improve the efficiency of ecological land in future urban construction.

Keywords: megacities; urban heat environment; urban heat island ratio index; remote sensing; surface landscape pattern

(责任编辑:陈理)