

# 基于遥感监测的城市热岛研究进展

李元征<sup>1,2</sup>, 尹科<sup>3</sup>, 周宏轩<sup>4</sup>, 王晓琳<sup>5</sup>, 胡聃<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 九江学院鄱阳湖生态经济研究中心, 江西 九江 332005; 4. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 5. 中国农科院烟草研究所, 山东 青岛 266101)

**摘要:**全球正经历快速、高强度的城市化, 导致城市热岛加剧, 并对城市、区域乃至全球许多的生态环境要素直接或间接地产生多方面的影响, 与人类福祉密切相关。遥感具有宽覆盖、信息量大、重复观测周期短等优点, 已成为地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)监测广泛采用的一种方法。针对前人相关研究对热红外数据源、监测指标及SUHI时空变化规律尚缺乏系统总结且内容需要更新等问题, 本文首先分类评述了SUHI遥感监测所采用的热红外遥感数据源。其次将现有的SUHI监测指标分为土地覆盖类型驱动型、地表温度格局驱动型及两者复合驱动型3类来述评, 详细介绍了它们的计算方法、应用案例及优缺点; 并从日间变化、夜间变化及昼夜对比的变化3个方面述评了SUHI的年内时空变化规律; 归纳了其年际变化规律。最后, 依据现有研究结论中相互冲突或尚需深化的地方, 指出几个潜在的关键问题或研究方向。

**关键词:**地表温度; 监测指标; 时空变化; 土地利用与土地覆盖; 地表生物物理参数; 研究进展

## 1 引言

2014年, 全球有54%的人口居住在城市, 预计至2050年该比例将上升至66%(UN DESA, 2014)。快速和高强度的城市化进程显著地改变着城市、区域乃至全球的生态环境(Simon et al, 2005)。其中城市地区气候的一个显著特征就是城市热岛效应, 即城区气温明显高于周边农村的现象(Howard, 1833; Manley, 1958)。城市热岛直接或间接地影响着局地气候(Kanda, 2007)、能源利用(Unger, 2004)、空气质量(Grimm et al, 2008)、城市水文(Grimm et al, 2008)、城市土壤理化性质(Shi et al, 2012)、生物空间分布和行为活动(Knapp, 2010)以及人类健康和舒适度等(Unger, 2004; Wong et al, 2013)。

城市热岛的研究方法主要包括气象站观测

(Memon et al, 2009)、定点现场观测(Huang et al, 2008)、移动样带观测(Huang et al, 2008)、数值模拟(Zehnder, 2002)和遥感监测法(Rao, 1972; Weng, 2009)。遥感具有时间同步性好、覆盖宽、可长时间连续监测等优点。随着卫星数量的增多及地球空间信息技术的发展, 热红外遥感已经成为城市气候和环境监测广泛采用的一种方法(Rao, 1972; Weng, 2009)。虽然基于遥感反演的地表温度(Land Surface Temperature, LST)并不等同于地表上面的气温, 但两者却是密切相关的(Mostovoy et al, 2006; Schwarz et al, 2011)。尽管如此, 为与传统的基于气温分析的城市热岛相区分, 通常将基于LST分析的称之为地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI) (Voogt et al, 2003; 胡华浪等, 2005; Yuan et al, 2007; 陈爱莲等, 2012; Zhan et al, 2014)。针对前

收稿日期: 2016-04; 修订日期: 2016-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571482); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2012-1-01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571482; Independent Program of State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, No.SKLURE2012-1-01]。

作者简介: 李元征(1986-), 男, 山东临清人, 博士研究生, 主要从事环境遥感方面的研究, E-mail: rushfuture@sina.com。

通讯作者: 胡聃(1963-), 男, 湖北北京山人, 研究员, 主要从事城市生态学方面的研究, E-mail: hudan@rcees.ac.cn。

引用格式: 李元征, 尹科, 周宏轩, 等. 2016. 基于遥感监测的城市热岛研究进展[J]. 地理科学进展, 35(9): 1062-1074. [Li Y Z, Yin K, Zhou H X, et al. 2016. Progress in urban heat island monitoring by remote sensing[J]. Progress in Geography, 35(9): 1062-1074.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.09.002

人相关研究对热红外数据源、监测指标及SUHI时空变化规律尚缺乏系统总结且内容需要更新等问题(胡华浪等, 2005; Weng, 2009; 陈爱莲等, 2012), 本文从上述3个方面对国内外SUHI遥感监测进展和不足进行综述, 并对今后的研究重点和方向给出建议。

2 热红外遥感的数据源

SUHI 监测常用的热红外数据源见表 1。其中, 对地静止卫星获取的数据, 包括 GOES/GOES、FY-2/SVISSR 和 MSG/SEVIRI 数据 (Tomlinson et al, 2011), 时间分辨率很高, 空间分辨率较低, 适合宏观监测单个、区域及全球多个超大型城市的 SUHI 的时空变化, 并在日动态监测上优势明显。但目前应用较少。

NOAA 系列的 AVHRR、Terra 和 Aqua 上的 MODIS 数据空间分辨率有了较大提升, 约为 1 km; 每天过境 4 次以上, 并可获取典型时刻的 LST 格局; 拥有较长的存档数据, 适合宏观监测单个、区域及全球多个城市的 SUHI 的时空变化。其中, AVHRR 数据的连续观测时间更长, 有 30 多年的存档数据; 而 MODIS 数据的其他波段数量更多、空间分辨率更高、过境时间较为稳定, 迄今也有十几年的连续观

测数据。这些数据目前均已得到广泛应用(Peng et al, 2011; Schwarz et al, 2011; Clinton et al, 2013; Haashemi et al, 2016; Ma et al, 2016; Shen et al, 2016), 主要用于分析超大及大型城市的热岛问题, 而很少应用于中小型城市。

中国自行研制的 HJ-1B/IRS 和 FY-3/MERSI 数据既可以在一定程度上克服 AVHRR 和 MODIS 数据空间分辨率略低以及 Landsat/TM、ETM+、TIRS 数据和 Terra/ASTER 数据返回周期较长的缺点, 又可以用于宏观监测 SUHI 时空变化, 还可用来分析其影响要素(Yang et al, 2010; Ye et al, 2011; 杨何群等, 2013; Wu et al, 2014)。

Landsat/TM、ETM+、TIRS 数据由于空间分辨率较高、存档时间长、数据可获取性好, 在监测单个或局地城市群地表热场时空变化, 特别是分析其影响因素方面优势明显, 已得到广泛应用(Chen et al, 2006; Zhou W Q et al, 2014; Liu et al, 2015; Pan, 2016; Shen et al, 2016); 但由于重返周期较长, 较难获取不同年份中相同甚至相近日期的可比性强的影像; 此外, 该数据过境时期热岛强度较弱(Chudnovsky et al, 2004)。Terra/ASTER 数据虽然时空分辨率更高, 但发射时间较晚、存档数据较少、数据可获取性差, 目前应用相对较少(Weng et al, 2008; Connors et al, 2013; Adams et al, 2014)。此外, 中巴

表 1 SUHI 监测常用的热红外数据源  
Tab.1 Frequently-used thermal infrared data sources for SUHI monitoring

平台/传感器	空间分辨率	覆盖周期	过境时间	起始年份	可用热红外波段数
GOES 系列/GOES 成像器	4 km	~0 d	多个, 间隔 30 min	1974	双
FY-2/SVISSR	5 km	~0 d	多个, 2006 年后间隔为 15 min	2004	双
MSG 系列/SEVIRI	3 km	~0 d	多个, 间隔 15 min	2005	双
NOAA 系列/AVHRR	1.1 km	≤0.25 d	具体见官网 <sup>①</sup>	1979	双
Terra/MODIS	1 km	0.5 d	~10:30、~22:30	2000	双
Aqua/MODIS	1 km	0.5 d	~01:30、~13:30	2002	双
HJ-1B/IRS	300 m	4 d	~10:00	2008	单
FY-3/MERSI	250 m	5.5 d	~10:45	2008	单
Landsat/TM、ETM+、TIRS <sup>②</sup>	60~120 m	16 d	~10:30	1982	单或双
Terra/ASTER	90 m	15 d	按要求	1999	多
CBERS/IRMSS、IRS <sup>③</sup>	80~156 m	26 d	~10:30	1999	单
机载	~1 m	按要求	按要求	1985	多
热视频辐射仪	~1.8 mrad	按要求	按要求	1997	多

注: ①表示: 多颗 NOAA 卫星上均载有 AVHRR(Tomlinson et al, 2011), 具体过境时间见官网。②表示: Landsat/TM、ETM+及 TIRS 传感器的空间分辨率分别为 120、60 与 100 m; 起始年份分别为 1982、1999 和 2013 年(其中, ETM+传感器于 2003 年 5 月后出现故障, 之后获取的数据有条带缺失); 仅 TIRS 传感器热红外波段数为双。③表示: CBERS/IRMSS 及 IRS 传感器的空间分辨率分别为 80 m 与 156 m; 起始年份分别为 1999 和 2014 年。

合作研制的CBERS/IRMSS、IRS数据虽然在空间分辨率、重返周期及存档数据与Landsat数据相比要较差,但可用作补充数据,目前应用也较少(张勇等, 2006)。

航空遥感获取的热红外数据空间分辨率高(Goldreich, 1985; Sobrino et al, 2013; Liu et al, 2014; Liu et al, 2015),适合分析地表热场与影响因素的相互关系。但其数据昂贵、获取不易,并多为瞬时数据而不重复观测,并很难获得大范围的数据。

热视频辐射仪可以较低成本即时连续地获取热红外信息,但受到角度、距离和地物遮挡的限制,仅能观测面积不大的区域(Voogt et al, 1997; Chudnovsky et al, 2004),目前应用也不多。

现有的热红外遥感数据具有多种时空分辨率,在全球、洲际及区域城市群、单个城市或小区SUHI时空演变规律监测及其影响要素分析中均有一定程度的应用。但仍存在以下2类问题:①虽然存在相关热红外遥感数据,但相关研究较少。如缺乏基于对地静止观测卫星数据对SUHI日动态的监测研究;缺乏基于热视频辐射仪对小区尺度全天时、全天候,特别是在阴天条件下的研究;较为缺乏对国产热红外遥感卫星优势挖掘的研究。②缺乏相关的热红外遥感数据,无法开展研究。如中等空间分辨率的夜间热红外数据较为缺乏,中分的白天热红外遥感数据的过境时间较少,高分热红外数据更为稀有。这些均直接影响到相关研究的开展。

### 3 监测指标

为定量监测地表城市热岛,前人发展了许多指标,按计算过程中的要素类型,大体上可分为土地覆盖类型驱动型、地表温度格局驱动型及两者复合驱动型3种(表2)(Schwarz et al, 2011; Schwarz et al, 2012)。

#### 3.1 土地覆盖类型驱动型监测指标

由于LST显著与土地覆盖相关,以往不少研究首先主要基于土地覆盖并同时考虑距离城区的空间距离、地形等确定“城市”、“郊区”或“乡村”的范围,然后计算城市或城市核心区与周边乡村(Dan et al, 2010; Imhoff et al, 2010; Tomlinson et al, 2012; Clinton et al, 2013; Haashemi et al, 2016; 葛荣凤等, 2016)、郊区(Peng et al, 2011; Zhou D C et al, 2014)、

农田(Jin et al, 2005; Haashemi et al, 2016)、森林(Jin et al, 2005)、水体(Chen et al, 2006; 朱焱等, 2010; Haashemi et al, 2016)的瞬时或累计地表温差来表征SUHI强度(表2)(Dousset et al, 2003)。值得注意的是,累计地表温差由于考虑了长时间对热岛的暴露情况,会更加科学(Clinton et al, 2013)。

虽然该类方法清晰、直接、有效且通用性强,但仍存在以下3个问题:①对城市、郊区和乡村的定义多样、甚至混乱(Schwarz et al, 2011),并由先验知识决定的。②这类指标有的未定义出城市、郊区和乡村的边界;或不少城郊乡间的边界是脱离具体生态过程来确定的,是唯一不变的。这不同于现实中城区气象要素对于周边地区影响范围的边界。实际上,即使在特定地区的特定外界条件下,对不同的气象要素来说,城区对于周边地区的影响范围也是不同的(Lowry, 1977)。此外,外界条件不同,同一种气象要素的影响范围也会不同,这是由于内在的生态学过程机制不同所导致的。例如白天和夜间的SUHI强度并不相关,其内在的驱动因素是不同的(Peng et al, 2011)。而此类方法中SUHI的影响区域完全基于土地覆盖而定,其默认前提就是土地覆盖是SUHI的唯一决定要素,这显然有失偏颇。③特定的土地覆盖类型,如农田、森林、水体等并不能完全代表乡村的生态要素特点。因为乡村是一个由多种土地覆盖要素整合的功能单元。基于特定土地覆盖类型的指标也不适用于周边缺乏该类土地覆盖类型的城市。

#### 3.2 地表温度格局驱动型监测指标

该类SUHI监测指标完全或主要依赖于LST格局,较少或完全不考虑土地覆盖类型(表2)。其中,高斯曲面拟合的方法首先掩去城区、郊区和水体范围内的LST场,得出乡村背景的LST场,并拟合出其空间分布;其次,将该区域初始的LST图层减去拟合出的乡村LST图层;然后对剩余区域的LST场进行高斯拟合,进而得出多种监测指标,如高斯面积(Streutker, 2002, 2003; Tran et al, 2006)、高斯幅度(Streutker, 2003; Tran et al, 2006)、高斯幅度经验值等(Schwarz et al, 2011)。此外,SUHI强度的量化指标还包括基于卷积核技术处理后区域LST的最大值和最小值的差值(Rajasekar et al, 2009)、区域LST的标准差(Schwarz et al, 2011)、LST高于区域LST均值与1倍标准差之和的热岛面积(Zhang et al, 2008)、各像元LST与研究区LST均值的差值与研



表2 SUHI的监测指标代表性类型  
Tab.2 Typical monitoring indicators of SUHI

指标类型	指标	量化方法	传感器、时间范围、文献
土地覆盖类型驱动型	地表温差	城市核心区与乡村LST均值的差值。前者指不透水面比例(ISA)大于75%的城区;后者指距离ISA为25%的等值线的45和50 km或15和20 km之间的ISA小于5%的区域。	MODIS;白天和夜间,多年;美国大陆上的超大城市; Imhoff等(2010)MODIS;白天和夜间,多年;全球3000多个城市;Zhang等(2010)
	地表温差 城市-乡村/K	行政建成区与乡村LST均值的差值。分别计算城乡地区最高与最低LST的幅度;然后计算城乡幅度的差值。 4个及其以上多层建筑结构城市像元与其5 km和10 km缓冲区内去除城区和水体像元的LST均值的差值。 对ISA比例大于50%区域进行聚合操作得到的城区与邻近12个一半城区面积缓冲区内最远的3个内去除水体像元后区域LST均值的差值。 全区与乡村气象站处LST的差值。 五环路内城区与指定代表乡村区域LST均值的差值。	Landsat-TM和ETM;白天,1天;南充和广安;Dan等(2010) MODIS;昼夜,1年;全球;Clinton等(2013) MODIS;昼夜,多年;中国32个大城市;Zhou et al(2015) MODIS;昼夜,多年夏季;伯明翰;Tomlinson等(2012) MODIS;昼夜,多年;北京;王建凯等(2007)
	地表温差 城市-郊区/℃	基于城区聚类算法得到的城区与邻近相同面积缓冲区内去除城区及水体像元后区域LST均值的差值。 对ISA比例大于50%区域进行聚合操作得到的城区与邻近相同面积缓冲区内去除水体像元后区域LST均值的差值。	MODIS;昼夜,多年;全球;Peng等(2011) MODIS;昼夜,多年;中国32个大城市;Zhou D C等(2014)
	地表温差 城市-农田/K	城区与农田LST均值的差值。	MODIS;白天和夜间,同一年中的1月和7月;全球;Jin等(2005) MODIS;白天和夜间,2年;德黑兰;Haashemi等(2016) MODIS;白天和夜间,同一年中的1月和7月;全球;Jin等(2005)
	地表温差 城市-林地/K	城区与林地LST均值的差值。	
	地表温差 城市-水体/K	城区与水体LST均值的差值。	Landsat-TM;白天,多年中的代表天;珠江三角洲;Chen等(2006) MODIS;白天和夜间,2年;德黑兰;Haashemi等(2016)
	地表温度格局驱动型	高斯面积/km <sup>2</sup>	乡村LST背景值去掉以后基于LST场数据拟合的高斯曲面下的面积。 NOAA-AVHRR;夜间,4月;休斯顿;Streutker(2002) MODIS;白天和夜间,多年;东亚和东南亚的超大城市;Tran等(2006)
		高斯幅度/K	乡村LST背景值去掉以后基于LST场数据拟合的高斯曲面的高度。 NOAA-AVHRR;夜间,4年;休斯顿;Streutker(2003) MODIS;白天和夜间,多年;东亚和东南亚的超大城市;Tran等(2006)
		高斯幅度经验值/K	城区与拟合后的乡村LST的最大差值。 MODIS;白天和夜间,某一年7月及另一年的1月和7月;263个欧洲城市;Schwarz等(2011)
		标准差/K	研究区内LST的标准差。 MODIS;白天和夜间,某一年7月及另一年的1月和7月;263个欧洲城市;Schwarz等(2011)
两者复合驱动型	幅度/K	基于卷积核技术处理后影像LST场的最大值和最小值的差值。	MODIS;白天和夜间,1年;印第安纳波利斯;Rajasekar等(2009)
	基于地温数理统计的热岛面积/km <sup>2</sup>	LST高于区域LST均值和一倍标准差之和的区域的面积。	Landsat-ETM+;白天,1天;广东的10个城市;Zhang等(2008)
	地温差值 高温区-低温区/℃	高温区(地温大于区域均值和一倍标准差之和的区域)与低温区(地温低于区域均值和一倍标准差之差的区域)LST均值的差值。	Landsat TM和ETM;白天,3年中的3天;珠江三角洲;张金区(2006)
	热岛变异指数	各像元LST与研究区LST均值的差值与研究区LST均值的比值。	CBERS02-IRMSS;白天,1天;北京、无锡;张勇等(2006)
	基于地温空间统计的热岛面积/km <sup>2</sup>	基于莫兰指数计算的空间相关性及热点分析的统计量来识别高温和低温聚集区。	Landsat Landsat/TM、ETM+;白天,5年中的5天;杭州;张伟等(2015)
	基于剖面突检测的热岛面积/km <sup>2</sup> 和强度/℃	对多条从市中心发射出的地表温度剖面利用诺夫法检测突变点即热岛边界并结合缓冲区分析法计算热岛强度。	MODIS;白天和夜间,多年7月;布加勒斯特;Cheval等(2009)
	亮温级别变化指数	对两期影像的LST单独进行分级;综合考虑各像元两期级别的变化类型和比例;旨在分析SUHI强度的变化趋势。	Landsat-TM和ETM;白天,2年中的2天;庐州;Xu等(2011)
	热岛比例指数	综合考虑了LST高于郊区区域中各等级所占的比例及强度;最后给出一个0~1范围内的数值。	Landsat-TM和ETM;白天,2年中的2天;厦门;徐涵秋等(2003)。FY-3A/MERSI和MODIS;白天和夜间,2年;北京;Ye等(2011) Landsat-TM和ETM;白天,3年中的3天;兰州;Pan(2016)
	加权平均热岛强度/℃	综合考虑城区内各级别LST所占的比例及其均值与郊区LST均值的差值。	Landsat-TM和ETM;白天,2年中的2天;庐州;Xu等(2011)

究区 LST 均值的比值(张勇等, 2006)、基于莫兰指数计算的空间相关性及热点分析得出的统计量来识别的热岛面积(张伟等, 2015), 采用诺夫法检测从市中心发射出的多个地表温度剖线的突变点确定城市热岛边界, 并结合缓冲区分析计算的 SUHI 强度(Cheval et al, 2009)。另外, 前人首先基于归一化的 LST 均值和标准差设定出规则将其划分为不同的冷热强度级别, 然后采用亮温级别变化指数(Brightness Temperature Grade Change Index, TGCI) 来量化 SUHI 强度(Xu et al, 2011)。

该类方法直接基于热力学生态过程的结果即 LST 格局来量化 SUHI 强度, 克服了土地覆盖类型驱动型指标只将土地覆盖类型作为唯一驱动要素而忽视生态过程的不足。但该类指数的主要问题首先是 LST 场通常需要满足一定的空间分布特征。如高斯曲面拟合的方法要求去掉背景温度场后剩余区域的 LST 场为高斯曲面, 但当白天发生城市冷岛时, 此条件并不成立。基于标准差概念的方法也需要研究区内的 LST 是符合正态分布的。但只有在研究区仅包含城区和郊区的情况下才可能会如此; 如果研究区内还包含乡村, 则因为城区和乡村像元数量较多使得 LST 经常表现为两头偏的分布类型。其次, 不少 LST 格局驱动型指标的计算结果和研究区边界的设定密切相关, 但这存在一定的主观性。再次, 完全忽视土地利用与土地覆盖(Land Use and Land Cover, LULC)及地形因素, 而仅仅基于地温空间统计获取的高温及低温聚集区有时会偏离用 SUHI 来反映城乡热格局对比的本意。而上文中提到的基于对剖面突变分析的方法可一定程度克服此问题, 并较好确定城市边界(Cheval et al, 2009), 但其计算热岛强度时并没确定郊区和乡村的边界, 从而导致其结果的生态意义模糊, 应在考虑周边地形、水体、卫星城等干扰因素的影响下, 进一步加以判别。此外, 还应对该方法的普适性加以检验。

### 3.3 土地覆盖类型及地表温度格局复合驱动的监测指标

该类指标同时关注土地覆盖类型和 LST 格局要素(表 2)。首先采用一定标准和方法将区域各像元的 LST 初始值(王天星等, 2009; Dan et al, 2010)、归一化的 LST 值(Xu et al, 2011; 张建明等, 2012)与区域 LST 均值的比值划分为不同的冷热强度级别(张勇等, 2006; 赵小锋等, 2009)。常见标准化方法

包括均值一标准差偏差法(张金区, 2006; Xu et al, 2011)、阈值法(孙飒梅等, 2002; 赵小锋等, 2009)、等距分割的方法(徐涵秋等, 2003; 张建明等, 2012)和空间统计与自然断裂法相结合的方法(Pan, 2016)。然后, 结合土地覆盖类型采用热岛比例指数(Urban Heat Island Ratio, URI)(徐涵秋等, 2003; Xu et al, 2011; Pan, 2016)或加权平均热岛强度(Weighted Average Heat Island Intensity, WAI)(Dan et al, 2010; Xu et al, 2011)来量化 SUHI 强度。该类指数继承了上述 2 类方法的问题, 如边界定义时的主观性、LST 分级标准的多样性、研究结果对研究区边界的敏感性等。

## 4 SUHI 的时空变化

上述监测指标均可一定程度上揭示 SUHI 的时空变化规律, 但是不同指标间相关性低、可比性差(Schwarz et al, 2011)。只有建立在同样量化指标的前提下的 SUHI 时空变化规律对比才科学(Schwarz et al, 2012)。此外, 不同时刻 SUHI 强度及格局差异显著。在同时注意监测指标及监测时间 2 类问题的基础上, 本文对前人工作加以归纳。

### 4.1 年内变化

#### 4.1.1 日间变化

大量研究表明, 除少数沙漠城市外, 白天全球绝大多数城市年均 SUHI 强度都是正数(Tran et al, 2006; Zhang et al, 2010; Peng et al, 2011); 发达国家白天的 SUHI 强度显著地高于发展中国家(Peng et al, 2011); 面积越大的城市 SUHI 越强(Zhang et al, 2010; Meng et al, 2013)。温带地区城市地表热岛强度和面积在夏季最大, 春秋次之, 冬季最弱并经常出现冷岛效应(Tran et al, 2006; 石涛等, 2013; Quan et al, 2014; Zhou D C et al, 2014; 赵颜创等, 2014); 热带地区城市则在整个干季变化不大(Tran et al, 2006)。但基于 Aqua/MODIS 数据对全球多个城市一年中白天 LST 超过 20℃时段内的 SUHI 研究表明, 白天全球普遍存在地表城市冷岛, 其强度最小值多在热岛最强值出现之前的晚春和夏季(Clinton et al, 2013)。基于 Terra/MODIS 数据对全球 1 月和 7 月多个城市的研究表明(Jin et al, 2005), 北半球高纬度地区, 白天城市比农村更冷。沙漠城市方面, 若采用城郊差或城乡差的方法, 则白天常年存在冷岛现象(Lazzarini et al, 2013; Haashemiet al, 2016), 冬

季比夏季的冷岛强度更大(Lazzarini et al, 2013);但若采用城市与农田或水体差值的方法,则白天不存在冷岛现象(Jin et al, 2005; Haashemiet al, 2016),且全球较大的城市和农田的地表温差会出现在沙漠广布的纬度地区(Jin et al, 2005)。

#### 4.1.2 夜间变化

通常夜间四季均存在 SUHI 现象(Jin et al, 2005; Prado, 2010; Peng et al, 2011; Clinton et al, 2013),全球 95%的城市热岛强度为 0~2℃(Peng et al, 2011),北半球强于南半球,特别是印度和巴基斯坦的热岛强度很大(Clinton et al, 2013),发达国家与发展中国家的热岛强度比较接近(Peng et al, 2011)。但在夜间 SUHI 的季节变化研究方面,结论却不一致,甚至用同一个时刻数据对同一个城市或城市群的分析结论也不一致。一些研究表明:冬季有明显的强 SUHI,热岛面积也最大,春秋次之,夏季最小(Ye et al, 2011; Lazzarini et al, 2013; Quan et al, 2014; Quan et al, 2016)。还有研究证明,夏季夜晚 SUHI 最强,冬季最弱(张佳华等, 2005; Prado, 2010; 曾胜兰, 2014);或温带城市 SUHI 最强的时刻普遍出现在秋季,而在热带地区则具有较大的时空变异性,特别是在印度和撒哈拉以南的非洲地区更是如此(Clinton et al, 2013);或夜间 SUHI 强度季节变化不明显(王建凯, 2007; Prado, 2010; 石涛等, 2013)。此外,基于 Terra 的 MODIS 数据对德黑兰研究发现,若采用城市与乡村差的方法,夜间常年存在热岛,其中 5 月最强;若采用城市与水体差值的方法,则在 3-9 月存在冷岛现象(Haashemi et al, 2016)。这些针对夜间 SUHI 季节变化的研究结论不一致,可能是由于各研究区特点、采用数据源、观测时间及监测指标的不同导致的。同时,这也说明了夜间 SUHI 内在驱动机制的复杂性。

#### 4.1.3 昼夜变化的对比

SUHI 的昼夜强度相关性很低(Peng et al, 2011; Schwarz et al, 2011; Klok et al, 2012)。全球不少城市白天的 SUHI 强度大于夜间(Tran et al, 2006; Cheval et al, 2009; Zhang et al, 2010; Peng et al, 2011; Schwarz et al, 2011; Haashemi et al, 2016),但仍有一些城市反之(Peng et al, 2011; Sobrino et al, 2013)。基于 Aqua/MODIS 数据对全球多个城市多年 SUHI 的监测表明,全球白天的平均 SUHI 强度显著高于夜间(Peng et al, 2011);但尚有 36%的城市夜间热岛更强,特别是在西亚、南亚和南非地区城市。年均

昼夜热岛强度最大的大洲是南美洲和北美洲;最低的为非洲(Peng et al, 2011)。SUHI 昼夜强度的对比结果还可能与季节密切相关。如基于 Terra/MODIS 对安徽典型城市昼夜热岛强度对比的季节变化研究表明,冬季和秋季夜晚的 SUHI 强于白天,春季和夏季则白天强于夜晚(石涛等, 2013)。此外,有研究采用热视频辐射仪对以色列特拉维夫冬季多种地物的 LST 开展了昼夜连续对比观测研究,结果表明:研究区内各地物 LST 的最大差异出现在约 12:00-13:00 时的正午时间(Chudnovsky et al, 2004)。每天 9:00-10:00 与 17:00-20:00 内地物热差异不显著,不利于被遥感识别。最佳识别时间为约 5:00 时的日出前的早晨,以及约 12:00-13:00 时的正午时间(Chudnovsky et al, 2004)。还有学者对 SUHI 昼夜足迹、城乡 LST 剖线特点、SUHI 空间形状及景观格局开展了对比研究。如基于 Aqua/MODIS 对中国 32 个大城市多年研究表明,夜间热岛的足迹范围比白天要大(Zhou et al, 2015)。虽然总体上昼夜地表温度由城区到乡村呈现指数衰减,但夜间夏、冬季的趋势差别不大,而白天的则差异很大(Zhou et al, 2015)。基于 Terra/MODIS 数据对东亚多个温带城市多年冬、夏两季和东南亚多个热带城市多年干季的研究表明,内陆城市 SUHI 昼夜形状类似,冬季面积会变小;但海滨城市 SUHI 强度的日变化规律是不同的,空间形状也不一样(Tran et al, 2006)。采用标准差法对美国印第安纳波利斯四季中午的 LST 进行分级,并分析其景观格局发现:除冬季外,其他季节的中午 LST 格局相似(Liu et al, 2008);冬季的平均斑块大小、聚合度和连接度均最大。

#### 4.2 年际变化

随着城市扩展, SUHI 空间范围变大,一些城市的 SUHI 格局也发生了轻度或重度的变化。如北京市由摊大饼型变为中心城区加周边卫星城镇分散的模式,并且昼夜地表热岛的重心均往东北方向偏移,南北维度上变化大于东西维度,总体呈现破碎化趋势(Quan et al, 2014; 刘勇洪等, 2014; 葛荣凤等, 2016)。成都市由中心型演变为多中心环形并且城市东北部和西南部高温区的温度梯度出现逆向升降趋势(但尚铭等, 2011; 曾胜兰, 2014; 张好等, 2014)。西安市城区内夏季白天的 SUHI 强度相对差异缩小,格局由中心城区模式转为建成区模式(杨丽萍等, 2015)。沈阳市和南宁市热岛均有从单中心变为多中心态势(李丽光等, 2013; 林奕桐等,



2014)。福州市总体趋势由西北—东南走向逐渐向北—南方向偏移,城市热岛重心向东南方向偏移(王天星等, 2009)。对兰州市和唐山市的夏季、上海市的秋季、宁波市的冬季及武汉市多年白天的研究表明,城市热岛斑块的数量和密度增加,斑块形状趋于复杂,景观越加分散,连接度降低(白杨等, 2013; 赵颜创等, 2014; 高建成等, 2015; Pan, 2016; Shen et al, 2016)。但宁波市夏季热岛虽然斑块数量也增多,形状也变复杂,但分布却更聚集(赵颜创等, 2014)。

城市各个地块的热岛强度有增有减或变化不大。随着城市扩展及人类活动增强,绝大部分地块的热岛强度虽然也会增加,特别是刚由郊区或乡村转换为城区的地块(Quan et al, 2014; Ramdani et al, 2014; Pan, 2016; 葛荣凤等, 2016);但对于那些已经针对性采取了一系列缓解 SUHI 措施的地块, SUHI 强度或程度反而会降低(徐涵秋等, 2003; 但尚铭等, 2011; Chen et al, 2016; Shen et al, 2016; 葛荣凤等, 2016)。值得一提的是,宁波市夏季的热岛强度在增强,冬季的却在变弱(赵颜创等, 2014)。其他代表性的研究还有对苏州市前后两期不同距离缓冲区内 LST 的标准差的对比研究(Xu et al, 2010)。该研究结果显示,随着与中心城区距离的加大,标准差逐步变大并在一定距离后保持高值,且数值明显高于城市化之前数值。还有学者关注了塞浦路斯一次热浪事件与同时段多年 SUHI 强度均值的区别,其中 2 个行政区明显增强,2 个则影响不大(Retalis et al, 2013);但热浪时期乡村昼夜 LST 也会增加,进而一定程度削弱热岛效应(Wu et al, 2013)。

一些学者采用多年的中分数数据来分析 SUHI 的年际变化。但通常较难获取不同年份同一时期的数据(徐涵秋等, 2003; Ramdani et al, 2014; 刘勇洪等, 2014; Shen et al, 2015; Pan, 2016)。卫星每日的过境时间也会有所变动(de Lucena et al, 2013; 刘勇洪等, 2014),而不同地物的 LST 与时刻密切相关(Chudnovsky et al, 2004),这些均会影响到 SUHI 格局和强度的年际对比结果。

## 5 启示与展望

虽然国内外已经开展了许多 SUHI 遥感监测的研究工作,但仍存在一些空白或现有结论相互冲突的领域,有待进一步深化。为更好地理解 SUHI,基

于上述综述提出几个潜在的关键问题或研究方向。

(1) 现有的热红外遥感数据时间分辨率高,但空间分辨率低。可基于 LST 与地表生物物理参数或 LULC 类型的关系实现 LST 尺度的下推(Zakšek et al, 2012; Weng et al, 2014),为 SUHI 时空变化的遥感监测提供时空分辨率均高的数据。此外,中分的夜间过境的热红外数据非常缺乏,极大地限制了对夜间 SUHI 时空变化及影响因素的研究。

(2) 目前,应用最广的星载热红外遥感数据存有一定不足,如时空分辨率较低、难以克服云层干扰、遮蔽的视场导致其难以观测近地面的地温分布、无法精细刻画平面及各立面地物表面温度等。机载的热红外遥感数据虽然空间分辨率高,但成本昂贵,并存在与星载数据类似的问题。据此,为精细分析 SUHI 的时空演变规律及影响要素,应积极开展基于热视频辐射仪对小区尺度全天时全天候、特别是阴天条件下的 SUHI 时空变化规律监测及影响要素分析。

(3) 现有的土地覆盖类型驱动的监测指标在使用中存在城郊乡边界定义多样甚至混乱(Schwarz et al, 2011)、脱离生态学过程、特定土地覆盖类型并不能完全代表乡村特点且不适用于周边缺乏该类土地覆盖的城市的问题;地表温度格局驱动的监测指标通常仅适用于研究区内地表温度符合一定空间分布或统计特征的情况,其结果对研究区边界的选择较为敏感,而且单独依靠地温统计特征得出的结果通常生态学意义模糊,甚至背离采用监测指标反映城乡差异的本意;土地覆盖与地表温度符合驱动型指数也同时存在上述 2 类方法的问题,如边界定义时的主观性、LST 分级标准的多样性、研究结果对研究区边界的敏感性等。据此,很有必要发展根据 LST 空间格局为主,以 LULC 为辅的指标。这类指标不仅具有生态学意义,而且普适性强、自动化程度高,并能考虑时间累计效应,可定量地确定城郊乡边界进而计算地表热岛面积和强度的监测指标。

(4) 不同监测指标所得结果相关性低、可比性差(Schwarz et al, 2011)。只有建立在同样量化指标前提下的 SUHI 时空规律对比才具科学性(Schwarz et al, 2012)。与此同时,前人研究主要集中在单个城市与区域城市群尺度,较少关注洲际及全球尺度的研究,导致较难科学、完整地理解 SUHI 的时空演变规律。为详细理解全球 SUHI 的时空变化规律,

今后应进一步开展基于统一的、科学的指标对多类气候带、多个不同规模城市在多个季节多个时刻或时间段内的监测研究。

(5) 与 LST 相比, 气温对人类热舒适度的影响更为直接。虽然 LST 数值的高低和气温密切相关, 但在城市环境中对两者直接进行转换依然无法获取到满意的结果(Wen et al, 2004; Mostovoy et al, 2006; 张金区, 2006; Schwarz et al, 2012)。未来应结合气象站数据、LST 数据、LULC 数据、地表生物物理参数、景观格局、地理位置等探索预测气温分布的方法(Wong et al, 2011; Hengl et al, 2012)。

(6) 目前, 相关研究通常仅关注如何消减热岛, 但 SUHI 的影响不一定完全是负面的, 应继续研究热岛对全球不同气候带、不同季节的正向、中性或负向的影响, 进而判别应在何时何地缓解、无视或增强热岛, 达到趋利避害的目的。

## 参考文献 (References)

- 白杨, 孟浩, 王敏, 等. 2013. 上海市城市热岛景观格局演变特征研究[J]. 环境科学与技术, 36(3): 196-201. [Bai Y, Meng H, Wang M, et al. 2013. Spatial and temporal changes of urban thermal landscape pattern in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 36(3): 196-201.]
- 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 2012. 基于景观格局的城市热岛研究进展[J]. 生态学报, 32(14): 4553-4565. [Chen A L, Sun R H, Chen L D. 2012. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(14): 4553-4565.]
- 但尚铭, 但玻, 许辉熙, 等. 2011. 环形热岛格局演变过程的遥感分析[J]. 长江流域资源与环境, 20(9): 1125-1130. [Dan S M, Dan B, Xu H X, et al. 2011. Analysis about evolution of annular urban heat island based on remote sensing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 20(9): 1125-1130.]
- 高建成, 尹泽凯, 张睿. 2015. 快速城镇化地区热岛景观动态变化研究: 以唐山市建成区为例[J]. 干旱区资源与环境, 29(9): 165-170. [Gao J C, Yin Z K, Zhang R. 2015. Spatial and temporal changes of urban thermal landscape pattern in rapid urbanization area: Taking Tangshan urban built-up area as examples[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(9): 165-170.]
- 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 等. 2016. 北京市城市化进程中热环境响应[J]. 生态学报, 36(19): doi: 10.5846/stxb201409301935. [Ge R F, Wang J L, Zhang L X, et al. 2016. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(19): doi: 10.5846/stxb201409301935]
- 胡华浪, 陈云浩, 宫阿都. 2005. 城市热岛的遥感研究进展[J]. 国土资源遥感, (3): 5-9, 13. [Hu H L, Chen Y H, Gong A D. 2005. Advances in the application of remotely sensed data to the study of urban heat island[J]. Remote Sensing for Land & Resources, (3): 5-9, 13.]
- 李乐, 徐涵秋. 2014. 杭州市城市空间扩展及其热环境变化[J]. 遥感技术与应用, 29(2): 264-272. [Li L, Xu H Q. 2014. Urban expansion and thermal environment changes in Hangzhou City of East China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 29(2): 264-272.]
- 李丽光, 许申来, 王宏博, 等. 2013. 基于源汇指数的沈阳热岛效应[J]. 应用生态学报, 24(12): 3446-3452. [Li L G, Xu S L, Wang H B, et al. 2013. Urban heat island effect based on urban heat island source and sink indices in Shenyang, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 24(12): 3446-3452.]
- 林奕桐, 叶骏菲, 林开平, 等. 2014. 南宁市热岛效应的遥感研究[J]. 灾害学, 29(4): 192-197. [Lin Y T, Ye J F, Lin K P, et al. 2014. Remote sensing research of heat island effect in Nanning[J]. Journal of Catastrophology, 29(4): 192-197.]
- 刘勇洪, 徐永明, 马京津, 等. 2014. 北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究[J]. 生态环境学报, 23(7): 1156-1163. [Liu Y H, Xu Y M, Ma J J, et al. 2014. Quantitative assessment and planning simulation of Beijing urban heat island[J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(7): 1156-1163.]
- 石涛, 杨元建, 马菊, 等. 2013. 基于MODIS的安徽省代表城市热岛效应时空特征[J]. 应用气象学报, 24(4): 484-494. [Shi T, Yang Y J, Ma J, et al. 2013. Spatial temporal characteristics of urban heat island in typical cities of Anhui Province based on MODIS[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 24(4): 484-494.]
- 孙飒梅, 卢昌义. 2002. 遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 41(1): 66-70. [Sun S M, Lu C Y. 2002. Study on monitoring intensity of urban heat island and taking it as an indicator for urban ecosystem by remote sensing[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 41(1): 66-70.]
- 王建凯, 王开存, 王普才. 2007. 基于MODIS地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析[J]. 遥感学报, 11(3): 330-339. [Wang J K, Wang K C, Wang P C. 2007. Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature[J]. Journal of Remote Sensing, 11(3):



- 330-339.]
- 王天星, 陈松林, 阎广建. 2009. 地表参数反演及城市热岛时空演变分析[J]. 地理科学, 29(5): 697-702. [Wang T X, Chen S L, Yan G J. 2009. Estimation of land surface parameters and spatio-temporal characteristics of urban heat island[J]. Scientia Geographica Sinica, 29(5): 697-702.]
- 徐涵秋, 陈本清. 2003. 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, 18(3): 129-133. [Xu H Q, Chen B Q. 2003. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 18(3): 129-133.]
- 杨何群, 周红妹, 尹球, 等. 2013. FY-3A/MERSI数据在典型大城市热环境监测预报中的应用: 以上海市为例[J]. 测绘通报, (11): 25-28, 32. [Yang H Q, Zhou H M, Yin Q, et al. 2013. Application of FY-3A/MERSI satellite data for thermal environment monitoring and forecast of typical cities: A case study of Shanghai[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (11): 25-28, 32.]
- 杨丽萍, 孔金玲, 郭玉芳, 等. 2015. 西安城区地表温度的遥感反演与时空演变分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 51(3): 388-396. [Yang L P, Kong J L, Guo Y F, et al. 2015. Inversion and temporal-spatial evolution analysis of land surface temperature in urban Xi'an based on remote sensing data[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 51(3): 388-396.]
- 曾胜兰. 2014. 道路建设对成都市热岛效应的影响[J]. 生态环境学报, 23(10): 1622-1627. [Zeng S L. 2014. The effect of road construction on urban heat island effect in Chengdu[J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(10): 1622-1627.]
- 张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 2014. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J]. 地球信息科学学报, 16(1): 70-78. [Zhang H, Xu H Q, Li L, et al. 2014. Analysis of the relationship between urban heat island effect and urban expansion in Chengdu, China[J]. Journal of Geo-Information Science, 16(1): 70-78.]
- 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 2005. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析[J]. 中国科学: 地球科学, 35(S1): 187-194. [Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, et al. 2005. The diurnal and seasonal characteristics of urban heat island variation in Beijing City and surrounding areas and impact factors based on remote sensing satellite data[J]. Science China: Earth China, 48(S2): 220-229.]
- 张建明, 王鹏龙, 马宁, 等. 2012. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究[J]. 地理科学, 32(12): 1530-1537. [Zhang J M, Wang P L, Ma N, et al. 2012. Spatial-temporal evolution of urban heat island effect in basin valley: A case study of Lanzhou City[J]. Scientia Geographica Sinica, 32(12): 1530-1537.]
- 张金区. 2006. 珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院: 广州地球化学研究所. [Zhang J Q. 2006. Thermal environment detection in the Pearl River Delta area by remote sensing and analysis of its spatial and temporal evolutions[D]. Guangzhou, China: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences: Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS.]
- 张伟, 蒋锦刚, 朱玉碧. 2015. 基于空间统计特征的城市热环境时空演化[J]. 应用生态学报, 26(6): 1840-1846. [Zhang W, Jiang J G, Zhu Y B. 2015. Spatial-temporal evolution of urban thermal environment based on spatial statistical features[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(6): 1840-1846.]
- 张勇, 余涛, 顾行发, 等. 2006. CBERS-02 IRMSS热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用[J]. 遥感学报, 10(5): 789-797. [Zhang Y, Yu T, Gu X F, et al. 2006. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect[J]. Journal of Remote Sensing, 10(5): 789-797.]
- 赵小锋, 叶红. 2009. 热岛效应季节动态随城市化进程演变的遥感监测[J]. 生态环境学报, 18(5): 1817-1821. [Zhao X F, Ye H. 2009. Monitoring the changes of urban heat island seasonal dynamics in the process of urbanization by remote sensing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 18(5): 1817-1821.]
- 赵颜创, 赵小锋, 旷达. 2014. 宁波城市热岛随城市化演变的多指标综合分析[J]. 生态环境学报, 23(10): 1628-1635. [Zhao Y C, Zhao X F, Kuang D. 2014. Multi-index analysis of heat island dynamics with the process of urbanisation in Ningbo City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(10): 1628-1635.]
- 朱焱, 朱莲芳, 徐永明, 等. 2010. 基于Landsat卫星资料的苏州城市热岛效应遥感分析[J]. 高原气象, 29(1): 244-250. [Zhu Y, Zhu L F, Xu Y M, et al. 2010. Study on the urban heat island of Suzhou City based on landsat remote sensing data[J]. Plateau Meteorology, 29(1): 244-250.]
- Adams M P, Smith P L. 2014. A systematic approach to model the influence of the type and density of vegetation cover on urban heat using remote sensing[J]. Landscape and Urban Planning, 132: 47-54.

- Chen L, Jiang R, Xiang W N. 2016. Surface heat island in Shanghai and its relationship with urban development from 1989 to 2013[J]. *Advances in Meteorology*, 22: 1-15.
- Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 104(2): 133-146.
- Cheval S, Dumitrescu A. 2009. The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2): 145-153.
- Chudnovsky A, Ben-Dor E, Saaroni H. 2004. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements[J]. *Energy and Buildings*, 36(11): 1063-1074.
- Clinton N, Gong P. 2013. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls[J]. *Remote Sensing of Environment*, 134: 294-304.
- Connors J P, Galletti C S, Chow W T L. 2013. Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona[J]. *Landscape Ecology*, 28(2): 271-283.
- Dan S M, Xu H R, Dan B, et al. 2010. Comparison and analysis of research methods for urban heat island effect based on Landsat TM6[C]//*Proceedings of the 2010 second IITA international conference on geoscience and remote sensing*. Qingdao, China: IEEE: 161-164.
- de Lucena A J, Filho O C R, França J R D A, et al. 2013. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3-4): 497-511.
- Dousset B, Gourmelon F. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(1-2): 43-54.
- Goldreich Y. 1985. The structure of the ground-level heat island in a central business district[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24(11): 1237-1244.
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. 2008. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 319: 756-760.
- Haashemi S, Weng Q H, Darvishi A, et al. 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city [J]. *Remote Sensing*, 8(4): 352.
- Hengl T, Heuvelink G B M, Tadić M P, et al. 2012. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2): 265-277.
- Howard L. 1833. *Climate of London deduced from meteorological observations* (Vol. 1)[M]. 3rd ed. London, UK: Harvey and Dolton Press.
- Huang L M, Zhao D H, Wang J Z, et al. 2008. Scale impacts of land cover and vegetation corridors on urban thermal behavior in Nanjing, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(3-4): 241-257.
- Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, et al. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 504-513.
- Jin M L, Dickinson R E, Zhang D L. 2005. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS[J]. *Journal of Climate*, 18(10): 1551-1565.
- Kanda M. 2007. Progress in urban meteorology: A review[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85B(S1): 363-383.
- Klok L, Zwart S, Verhagen H, et al. 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 64: 23-29.
- Knapp S, Kühn I, Stolle J, et al. 2010. Changes in the functional composition of a central European urban flora over three centuries[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 12(3): 235-244.
- Lazzarini M, Marpu P R, Ghedira H. 2013. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 130: 136-152.
- Liu H, Weng Q H. 2008. Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144(1-3): 199-219.
- Liu K, Su H B, Zhang L F, et al. 2015. Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data[J]. *Remote Sensing*, 7(4): 4804-4833.
- Liu K, Zhang X H, Li X K, et al. 2014. Multiscale analysis of urban thermal characteristics: Case study of Shijiazhuang, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083649.
- Lowry W P. 1977. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2): 129-135.
- Ma Q, Wu J G, He C Y. 2016. A hierarchical analysis of the relationship between urban impervious surfaces and land sur-

- face temperatures: Spatial scale dependence, temporal variations, and bioclimatic modulation[J]. *Landscape Ecology*, 31(5): 1139-1153.
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84: 70-72.
- Memon R A, Leung D Y C, Liu C H. 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating[J]. *Atmospheric Research*, 94(3): 491-500.
- Meng F, Liu M. 2013. Remote-sensing image-based analysis of the patterns of urban heat islands in rapidly urbanizing Jinan, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(24): 8838-8853.
- Mostovoy G V, King R L, Reddy K R, et al. 2006. Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 43(1): 78-110.
- Pan J H. 2016. Area delineation and spatial-temporal dynamics of urban heat island in Lanzhou City, China using remote sensing imagery[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(1): 111-127.
- Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. 2011. Surface urban heat island across 419 global big cities[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(2): 696-703.
- Prado D. 2010. Characterizing urban heat island phenomenon of four Texas cities using MODIS LST products[D]. San Antonio, TX: The University of Texas.
- Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, et al. 2014. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 149: 33-46.
- Quan J L, Zhan W F, Chen Y H, et al. 2016. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6): 2638-2657.
- Rajasekar U, Weng Q H. 2009. Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1): 86-96.
- Ramdani F, Setiani P. 2014. Spatio-temporal analysis of urban temperature in Bandung City, Indonesia[J]. *Urban Ecosystems*, 17(2): 473-487.
- Rao P K. 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53(7): 647-648.
- Retalis A, Paronis D, Michaelides S, et al. 2013. Study of the August 2010 heat event in Cyprus[M]//Helmis C G, Nastos P T. *Advances in meteorology, climatology and atmospheric physics*. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer, 265-270.
- Schwarz N, Lautenbach S, Seppelt R. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3175-3186.
- Schwarz N, Schlink U, Franck U, et al. 2012. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators: An application for the city of Leipzig (Germany) [J]. *Ecological Indicators*, 18: 693-704.
- Shen G R, Ibrahim A N, Wang Z J, et al. 2015. Spatial-temporal land-use/land-cover dynamics and their impacts on surface temperature in Chongming Island of Shanghai, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 36(15): 4037-4053.
- Shen H F, Huang L W, Zhang L P, et al. 2016. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 172: 109-125.
- Shi B, Tang C S, Gao L, et al. 2012. Observation and analysis of the urban heat island effect on soil in Nanjing, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 67(1): 215-229.
- Simon D, Sanchez-Rodriguez R, Seto, K, et al. 2005. *Science plan: Urbanization and global environmental change*[R]. Bonn, Germany: International Human Dimensions Programme: 18-25.
- Sobrino J A, Oltra-Carrió R, Soria G, et al. 2013. Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10): 3177-3192.
- Streutker D R. 2002. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2595-2608.
- Streutker D R. 2003. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 282-289.
- Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E, et al. 2011. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review[J]. *Meteorological Applications*, 18(3): 296-306.



- Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E, et al. 2012. Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images[J]. *International Journal of Climatology*, 32(2): 214-224.
- Tran H, Uchiama D, Ochi S, et al. 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1): 34-48.
- Unger J. 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach[J]. *Climate Research*, 27(3): 253-264.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights[R]. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs: 20.
- Voogt J A, Oke T R. 1997. Complete urban surface temperatures[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 36(9): 1117-1132.
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.
- Weng Q H. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 335-344.
- Weng Q H, Fu P. 2014. Modeling diurnal land temperature cycles over Los Angeles using downscaled GOES imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97: 78-88.
- Weng Q H, Liu H, Liang B Q, et al. 2008. The spatial variations of urban land surface temperatures: Pertinent factors, zoning effect, and seasonal variability[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2): 154-166.
- Weng Q H, Yang S H. 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city[J]. *Journal of Environmental Management*, 70(2): 145-156.
- Wong K V, Paddon A, Jimenez A. 2013. Review of world urban heat islands: Many linked to increased mortality[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(2): 022101.
- Wong N H, Jusuf S K, Syafii N I, et al. 2011. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption[J]. *Solar Energy*, 85(1): 57-71.
- Wu C D, Lung S C C, Jan J F. 2013. Development of a 3-D urbanization index using digital terrain models for surface urban heat island effects[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 817: 1-11.
- Wu H, Ye L P, Shi W Z, et al. 2014. Assessing the effects of land use spatial structure on urban heat islands using HJ-1B remote sensing imagery in Wuhan, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32: 67-78.
- Xu H X, Chen Y H, Dan S M, et al. 2011. Dynamical monitoring and evaluation methods to urban heat island effects based on RS & GIS[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 10: 1228-1237.
- Xu Y M, Qin Z H, Wan H X. 2010. Spatial and temporal dynamics of urban heat island and their relationship with land cover changes in urbanization process: A case study in Suzhou, China[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38(4): 654-663.
- Yang J, Peng G, Zhou J X, et al. 2010. Detection of the urban heat island in Beijing using HJ-1B satellite imagery[J]. *Science China Earth Science*, 53(S1): 67-73.
- Ye C H, Liu Y H, Quan W J, et al. 2011. Application of urban thermal environment monitoring based on remote sensing in Beijing[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 11: 1424-1433.
- Yuan F, Bauer M E. 2007. 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*, 106(3): 375-386.
- Zakšek K, Oštir K. 2012. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 117: 114-124.
- Zehnder J A. 2002. Simple modifications to improve fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for atmospheric research mesoscale model performance for the Phoenix, Arizona, metropolitan area[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 41(9): 971-979.
- Zhan W F, Ju W M, Hai S P, et al. 2014. Satellite-derived subsurface urban heat island[J]. *Environmental Science & Technology*, 48(20): 12134-12140.
- Zhang J Q, Wang Y P. 2008. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM+ data [J]. *Sensors*, 8(11): 7453-7468.
- Zhang P, Imhoff M L, Wolfe R E, et al. 2010. Characterizing urban heat islands of global settlements using MODIS and nighttime lights products[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing: Journal Canadien de Télédétection*, 36(3): 185-

196.

Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, et al. 2014. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 152: 51-61.

Zhou D H, Zhao S Q, Zhang L X, et al. 2015. The footprint of urban heat island effect in China[J]. *Scientific Reports*, 5:

11160.

Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, et al. 2014. 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 [J]. *Landscape Ecology*, 29(1): 153-167.

## Progress in urban heat island monitoring by remote sensing

LI Yuanzheng<sup>1,2</sup>, YIN Ke<sup>3</sup>, ZHOU Hongxuan<sup>1</sup>, WANG Xiaolin<sup>1</sup>, HU Dan<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Poyang Lake Eco-Economy Research Centre, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, China; 4. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 5. Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao 266101, Shandong, China)

**Abstract:** Rapid and high intensity urbanization is currently occurring in the world, resulting in increasingly more serious urban heat island phenomenon. Urban heat islands have direct and indirect impacts on various eco-environment factors of cities, regions, and the world, which are closely related to the human well-being. Remote sensing method has been widely used for Surface Urban Heat Island (SUHI) monitoring for its obvious advantages, such as wide range, huge amount of information, short observation cycle, among others. Considering the issue that existing studies have not systematically summarized the thermal infrared data sources, monitoring indicators, and the spatiotemporal variation patterns of monitoring results, and the related information needs to be updated, this study conducted a review of progress of surface urban heat island monitoring by remote sensing. First, we presented and classified the thermal infrared remote sensing data sources for the SUHI monitoring by remote sensing in previous studies. Second, we divided the monitoring indicators into three types, including land cover types-driven kind, Land Surface Temperature (LST) pattern-driven kind, and complex kind driven by both land cover types and LST pattern. We introduced the main indicator calculation methods and application cases in detail and analyzed their advantages and disadvantages. We then reviewed the intraannual spatiotemporal change regulation of the SUHI from three aspects, including diurnal variation, nocturnal variation, and comparative variations between day and night. We also considered the patterns of interannual changes. Finally, we proposed several key issues and potential research directions based on the research areas in which conflicting conclusions are found or research needs to be deepened in the existing studies.

**Key words:** land surface temperature; monitoring indicator; spatiotemporal variation; land use and land cover; surface biophysical parameter; research progress