DOI: 10.5846/stxb201610202142
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.生态学报,2017,37(23):7769-7780.
Liu Y X, Peng J, Wang Y L. Relationship between urban heat island and landscape patterns: From city size and landscape composition to spatial configuration. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7769-7780.

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

刘焱序[1,2],彭 建[1,*],王仰麟[1]
1 北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871
2 北京师范大学地理科学学部,地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

摘要:景观格局的改变被视为城市热岛形成的直接原因,但景观格局指标与热岛效应的关联机理仍未厘清。城市规模、景观组分、空间构型作为景观格局的重要表征指标,对热岛效应的影响体现了从整体到局部、从数量到空间的递进关系。其中,城市规模与热岛效应的关联存在地带性规律;景观组分与热岛效应的相关性受昼夜、季节控制;显著驱动热岛效应的关键空间构型指标仍有待遴选。景观格局与热岛效应的非线性关联可能存在拐点,拐点前后对应不一致的因子驱动强度。科学界定城市规模、景观组分、空间构型等景观格局要素显著影响热岛效应的阈值区间,有助于明晰缓解城市热岛效应的关键景观生态途径。

关键词:热岛效应;城市规模;景观组分;空间构型;关联阈值

Relationship between urban heat island and landscape patterns: From city size and landscape composition to spatial configuration

LIU Yanxu[1,2], PENG Jian[1,*], WANG Yanglin[1]
1 *Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*
2 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

Abstract: In concert with the rapid process of urbanization, both the spatial extent and intensity of the urban heat island (UHI) effect have been continuously increasing in China. The transformation of landscape patterns is considered to be a direct factor influencing UHI. However, the contributions of various landscape metrics to UHI still require further clarification. City size, landscape composition, and spatial configuration are the three main indicators of landscape patterns. The influences of these three indicators on UHI show a progressive relationship, both from integrity to locality, and from amount to spatiality. Thus, the relationship between landscape patterns and UHI has been divided into three hierarchical aspects. Firstly, the correlations between city size and UHI are typically influenced by the climate. The influence of climatic zonation on the relationship between city size and UHI should be further explored. Secondly, the significant correlations between several landscape composition factors and UHI have been revealed to be under the conditional control of season and day-night cycle. To date, urbanization effects, such as socio-economic influence on UHI, have not received enough attentions. Thirdly, the contributions of spatial configuration factors to UHI are obscure. The key spatial configuration factors significantly influencing UHI and their implications for urban planning and management should be investigated more thoroughly. It is deduced that a tipping point may exist in the nonlinear correlation between landscape patterns and UHI, which corresponds to the inconsistent driving mechanism on both sides of the tipping point. By combining the application of

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41671182)
收稿日期:2016-10-20; **网络出版日期**:2017-08-14
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

remote sensing, geographical information system, and field observations, the thresholds of landscape pattern contributions could be indicated from the identified tipping points. Specifically, by comparing the spatiotemporal characteristics of the relationship between city size and UHI in different climatic zones, revealing the urbanization effect on the correlations between landscape composition and UHI, and determining the contributions of spatial configuration on UHI while controlling specific factors, the thresholds could be comprehensively identified. The findings will provide insights into three key landscape approaches to relieving UHI.

Key Words: urban heat island; city size; landscape composition; spatial configuration; correlation threshold

城市热岛(Urban Heat Island, UHI)效应是指城市化所导致的城市气温高于周边郊区的现象[1]。作为城市化最明显的气候响应形式,城市热岛直接改变了城市居民的热舒适度和整体生活质量,是人类活动导致气候变暖并反馈于自身生产、生活的直接体现[2-5]。在全球气候变暖和快速城市化背景下,城市热岛效应加剧了城市极端高温发生的范围和强度,导致城市居民的高温健康风险显著增大[6-9]。人类活动导致地表下垫面改变,直接影响地表对太阳辐射的吸收,是城市化形成热岛效应的重要途径;而这种地表下垫面改变的过程直接反映在城市景观的异质性格局中[10]。因此,作为城市热岛效应形成的直接原因,城市景观格局的时空分异特征在相当程度上决定了城市热岛效应的不同强度。

景观格局与生态过程的耦合是景观生态学的核心研究领域。景观格局不仅体现着各种生态过程在不同时空尺度上相互作用的结果,同时又决定着各种自然环境因子在景观空间的分布和组合,从而制约各种生态过程[11-14]。热岛效应作为代表性的城市化生态环境效应,是城市景观格局演变的最直接后果之一[15]。厘清城市热岛效应与景观格局的关联机理,是对景观格局与生态过程互馈研究在城市地域的进一步深化,将为优化景观格局、缓解城市热岛效应提供核心科学依据[16-18],从而有助于在学科理论层面丰富景观格局与生态过程耦合机制的探索、推动城市景观生态学理论与方法内核的凝练,在实践层面为推进我国新型城镇化建设、提升城市适应气候变化能力提供可操作的景观优化途径。

1 城市热岛效应的景观格局驱动

1.1 城市热岛效应的界定与度量

城市化进程中不平衡的能量收支导致了城市更温暖的气候条件,即城市热岛效应[19]。狭义的城市热岛效应专指城市热岛强度,即城区气温与郊区气温的差;广义的城市热岛效应除了热岛强度外,还包括热岛现象诱发的干湿气候特征[20]。英国气象学者 Howard 在 19 世纪对伦敦市区气温比周围乡村气温高的现象进行监测,成为最早的热岛效应研究[21]。在标准意义上,城市热岛效应的强度被定义为城市热岛中心的气温峰值与相同时间、相同高度下城郊气温的差值[22]。鉴于城市高温中心的不稳定和城市郊区范围划定的困难性,一般将城市热岛强度表征为城区气象台站与最近的城区外气象台站的温度差。显然,温度测量装置的有限性较大程度的限制了大气城市热岛与景观格局的关联研究。

城市热岛效应主要源于景观变化改变地表反照率和城市化产生大量人为热两个方面,目前有关这两种驱动力对城市热岛强度的贡献率尚存争议,尤其是景观变化对城市热岛效应演化的驱动力仍有待厘清[23]。卫星热红外传感器的诞生使得具有空间连续性的热红外地表温度(Land Surface Temperature, LST)成为表征地表城市热岛的有效方式[24]。由于传感器工作机制与气温计不同,导致地表城市热岛与大气城市热岛在昼夜规律上存在明显差异;虽然学界至今尚未在解释该规律的不一致性上取得突破,但显然相对于大气城市热岛,研究景观变化对地表城市热岛的驱动更具备可操作性[23]。基于此,依托 LST 的较高空间分辨率,地表城市热岛强度可以与城市景观格局的相关参数进行有效衔接,业已成为研究城市热岛效应与景观格局关联的主要途径。

http://www.ecologica.cn

1.2　驱动因素划分与测度难点

国内外大量研究证实,城市规模、景观组分以及空间构型三类因素均对城市热岛效应具有驱动作用,且这三类因素对热岛效应的影响具有层次性。其中,城市规模是景观格局在城市整体视角的概化,存在着“在外部因素控制下,城市总体规模越大、城市化强度越高,则热岛效应是否随之增强”的研究命题,从研究内容而言处于较宏观的层次。景观组分因素可以是针对城市整体的平均值,但更多研究聚焦“特定城市内部的景观组分异质性所导致的热岛效应或地表温度空间分异”,在研究内容的层次性上低于对城市整体规模的描述,研究结论仅针对所聚焦的特定城市成立。景观空间构型是景观格局的形态学展示,从研究内容的层次性而言处于最低。从特定城市中选取景观组分相对一致的样本,探讨空间构型的影响会得到相对可靠的结果,而“景观的空间分布形态是否对热岛效应有影响,该影响与景观组分的影响有何不同”则是空间构型研究聚焦的重要命题。整体而言,上述三类因素的组合形成了总体规模影响、内部组分影响、局部形态影响的多层次城市热岛效应驱动,构成了景观格局与热岛效应关联的研究体系。

相对而言,在三类因素与城市地表温度的关联研究中,对景观组分的关注最多,结论也相对明确[25-28]。同时,以城市规模控制为出发点,一些涉及较多城市样本的研究在较大尺度上探讨了城市规模与热岛效应的关系,得出大城市比小城市更热的结论,但城市景观格局中建成区规模与热岛效应之间的关联尚未在国内外学术界达成基本共识[29-30]。此外,一些景观生态学者在考虑景观规模、组分的前提下详细论证了景观空间构型与城市热岛效应的相互关系,提出了影响城市热岛效应的一些关键景观格局指数[31-34]。伴随着中国改革开放以来快速城市化进程,城市建成区的高速扩张引致了城市热环境的显著变化。然而,中国地域辽阔,气候背景与城市化阶段的巨大差异导致了中国城市热岛形成机制的复杂性[35-41],在不同时空统计样本中城市热岛效应与景观格局的关联特征并不一致。当前,针对不同城市的研究案例中,研究目标和方法各有侧重而相对未成体系;城市景观格局指标与热岛效应的关联关系存在较大差异,城市规模、景观组分、空间构型等景观格局要素对热岛效应的贡献程度难以厘清;并且,未能形成城市适应气候变化能力提升的普适性景观优化途径。

景观格局与生态过程互馈机制是景观生态学研究的核心议题,对于城市景观中格局与过程互馈机制的解析是识别城市可持续性的关键环节。一方面,对于景观格局与城市热岛效应关联机理的探究,是对景观生态学格局与过程互馈核心议题的重要实践探索,实现对理论规律的定量化支撑,有助于学科体系的进一步完善;另一方面,缓解城市热岛效应、提升城市适应气候变化能力,是城市生态文明建设的重要目标之一。针对景观格局与热岛效应关联呈现的非线性规律,仅判定驱动力是否存在显然不足以展示格局对过程的影响机理,难以为城市热岛效应缓解提供足够的定量化指引。亟需回答的问题是,在何种控制条件或取值范围内,景观格局指标可以较强的缓解热岛效应?换而言之,在非线性关系中是否存在特定的拐点,该拐点所对应的景观格局指标阈值前后,存在不一致的驱动节律或强度?在此目标下,科学识别景观格局显著驱动热岛效应的阈值区间,可以为面向热岛效应缓解的景观规划提供定量化的城市规模、景观组分、空间构型的指标控制范围,成为新型城镇化战略下生态宜居城市建设的重要决策保障。

2　UHI 与城市规模的关联:聚焦地带性规律

2.1　规模指标关联特征

城市规模的扩张是城市化的直观体现。既然热岛效应是城市化的直接后果,那么城市总体规模作为城市化的定量化反映,很可能与热岛效应存在某种形式的关联。早在 1970 年代,加拿大学者 Oke 就发现城市人口规模与热岛效应呈现正相关[42]。21 世纪以来,学者们基于大样本、多时相的遥感观测数据分析了城市规模与城市热岛的关联规律(表 1)。在亚洲与北美的研究结果都发现,城市人口规模与热岛效应存在正相关;但亚洲 18 个特大城市显现出白天相关性大于夜晚的关联规律[43],而北美 65 个湿润气候区城市显现出夜晚相关性大于白天的特征[30]。同时,城市建成区规模与热岛效应的关联结论亦有所冲突。在全球和国家尺度,北

美温带城市夏季白天的热岛效应与建成区规模相关性最高[44],基于全球城市样本聚类的结果则显示出平均热岛效应与城市规模在夜晚呈现显著的幂律关系[29]。然而,全球 419 个大城市样本的分析表明热岛效应与建成区面积以及人口规模并无显著关联[45],中国 32 个大城市的建成区面积也与热岛效应的相关性不显著[46]。在区域尺度,京津冀大于 2km^{2}建成区斑块中热岛效应与建成区面积显著相关,而小于 2km^{2}的斑块则不存在该关系[47]。由此可知,城市规模与热岛效应存在显著关联,但关联特征受统计样本的地域范围决定。

表 1 城市规模与热岛效应的关联研究对比

Table 1 Comparison of the relationships between city size and UHI

文献 References	年份 Year	研究样本 Research sample	关联对象 Related indicator	关联关系 Relationship
Tran 等[43]	2001—2003	亚洲 18 个大城市	城市人口	与 UHI 线性正相关,白天强于夜晚
Imhoff 等[44]	2003—2005	北美 45 个温带阔叶混交林区城市	建成区面积,限定 ISA > 0.25	与 UHI 对数正相关,夏季白天相关性最强
Zhao 等[30]	2003—2012	北美 65 个城市	城市人口	与 UHI 对数正相关,夜晚相关性更强
Clinton 和 Gong[29]	2010	全球城市聚类为 20 个样本	建成区面积	取 20℃以上天数合成时,夜晚与 UHI 显著相关
Peng 等[45]	2003—2008	全球 419 个大城市	夜间灯光,城市面积和人口	夜晚 UHI 与灯光显著线性正相关,与城市面积和人口无显著相关
Zhou 等[46]	2003—2012	中国 32 个城市	建设用地面积比例	与 UHI 无显著相关性
Tan 和 Li[47]	2010	京津冀 1124 个城、镇、村聚落	大于 2km^{2}建设用地斑块面积	与 LST 对数正相关,夜晚相关性更强

ISA:不透水地表面积,Impervious Surface Area;UHI:热岛强度,Urban Heat Island

2.2 规模关联规律解析

UHI 与城市规模的关联分析研究途径在统计方式、研究时长、表征参数、空间范围等方面都存在分异,而样本空间范围可以被认为是影响统计结果的最重要因素。就统计方式而言,以对数模型而非线性模型建立回归方程容易得到更为可靠的结论,这是由于城市规模所涉及的人口、经济、土地面积等指标往往呈现幂律、指数等非线性特征,而样本中温度的增减关系则很难具备对应的如此大幅差异。就研究时长而言,单一城市中 10 个左右的年份样本依然是偏少的,而长时间尺度研究仅仅增加了样本的统计量,并未能进行时序回归。就对城市规模的表征参数而言,人口和建成区面积本身具有较强的关联性,但真实居住于市中心的人口数量往往不易获取,因而采用遥感手段提取城市景观中的建成区面积开展相关分析精度相对更高。从研究样本的空间位置来看,全球乃至部分国家尺度的研究,容易得到 UHI 与城市规模不相关的结论;而在区域气候背景较一致的条件下,大多数研究统计出 UHI 或 LST 与城市规模显著相关的结果。因此,衡量城市规模对城市热岛效应的作用有必要强调控制变量的一致性,例如在相同的气候带下进行空间采样。

不同城市样本和采样时间得到的研究结果有所冲突,表明城市规模与城市热岛效应的关联规律可能受到多重时空条件影响。如何刻画该关联规律的影响机制、获取特征控制变量,成为城市规模与热岛效应关联研究的重要趋向。为判断城市规模与城市热岛效应的关联性是否具有地带性规律,有效剥离空间采样过程中的干扰项,以下科学问题值得重点关注:城市规模与热岛效应的昼夜关联规律是否仅在特定的气候分区成立?或者受特定的社会经济条件影响?是否仅在特定的城市建成区规模以上成立?而区分关联规律成立与否的阈值或所谓的临界点又如何确定?大城市的城市规模扩张与热岛效应增强是否存在显著的时序关联特征?在不同气候带中该时序关联特征是否具备特定的空间规律?

3 UHI 与景观组分的关联:厘定城市化影响

3.1 组分指标关联特征

景观组分即景观类型的成分占比,其与太阳辐射的热量吸收、水分的蒸散吸热过程直接对应,决定了地表

http://www.ecologica.cn

的热量传输关系,从而直接影响城市热岛强度。除传统的景观类型面积比例外,遥感监测得到的生物物理参数也是景观组分的有效刻画方式。其中,归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、不透水地表面积(Impervious Surface Area, ISA)作为影响热岛效应的关键景观组分指标,被广泛用于探讨热岛效应和景观格局的关联规律[48-50]。此外,土地利用类型及与之密切相关的归一化差值建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)、增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、归一化差值水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)等亦是衡量热岛效应与景观组分关联关系的常用指标[51-54]。相关案例分析表明,ISA、NDBI、NDWI、NDVI 等指标与热岛效应相关性较强(表 2)。然而,在统计尺度与季相的差异背景下,上述生物物理参数指标并非在任何条件下均与城市热岛效应显著相关。

表 2　城市景观组分与热岛效应的关联研究对比

Table 2　Comparison of the relationships between landscape composition and UHI

文献 References	季相 Season	城市 City	典型关联要素 Key related indicator	关联关系 Relationship
Heinl 等[50]	夏季	South Tyrol (Italy)	△NDVI、太阳辐射	与 UHI 显著相关
Guo 等[49]	夏季	广州	NDVI、NDBI	与 LST 显著相关
Li 等[31]	春季、夏季	上海	NDVI、ISA、植被覆盖度	与 LST 显著相关,夏季高于春季
Zhou 等[33]	夏季	Baltimore (USA)	建筑、路面、乔灌木、草地、裸土、水域的比例	建筑、路面、乔灌木的比例与 LST 显著相关
Chen 等[34]	夏季	北京	不透水表面比例	可解释 56%的 LST
Ma 等[48]	秋季	广州	植被覆盖度、ISA	像元尺度相关性弱,行政区尺度显著相关
Peng 等[55]	夏季	北京	生态用地比例	当比例大于 70%时,降温效果明显提升
Chen 等[56]	春季、秋季	珠三角	NDVI、NDBI、NDWI 等	UHI 与各指标显著相关
Yuan 和 Bauer [57]	四季	Minnesota (USA)	NDVI、ISA	LST 与 ISA 线性相关,但与 NDVI 相关性弱
Li 等[58]	四季	上海	植被覆盖度	与 LST 冬季不相关,其他季节呈现指数、对数或线性相关
Zhou 等[59]	四季	Baltimore (USA)	NDVI、树冠的投影比例	均与 LST 显著相关,夏季相关性最高
Peng 等[45]	夏季、冬季	全球 419 个城市	△EVI	与 UHI 白天显著相关,晚上不相关
Zhou 等[46]	夏季、冬季	中国 32 个城市	△EVI	与 UHI 夏季白天显著相关,其他时相不相关

注:△:样本值与背景值的差值;LST:地表温度,Land Surface Temperature;NDVI:归一化差值植被指数,Normalized Difference Vegetation Index;NDBI:归一化差值建筑指数,Normalized Difference Built-up Index;EVI:增强植被指数,Enhanced Vegetation Index;NDWI:归一化差值水体指数,Normalized Difference Water Index

研究普遍发现,反映建设用地比例的 ISA、NDBI 等参数在各个季节均与 LST 及其城乡差值(UHI)呈现显著负相关,而反映地表植被生长的 NDVI、EVI 等参数并不一定与 LST 和 UHI 显著相关。对夏季城市热岛效应的研究结果显示 NDVI 和 LST、△NDVI 和 UHI 显著相关的结论[31,49-50],而另一些包含冬季的研究案例则在 NDVI 与 LST、△EVI 与 UHI 是否相关的判断上显示出较大的季节与昼夜差异[45-46,57-59]。同时,不同的统计粒度和幅度也会显著改变景观组分参数与 LST 关系的显著性,在精细粒度上与 LST 高度相关的绿地面积可能在粗粒度上与 LST 无关,在像元统计上与 LST 无关的植被覆盖度则可能在行政区统计上与 LST 相关[48,60]。

3.2　组分关联规律解析

在对 UHI 与城市景观组分的关联解析中,温度取值、参数获取、统计单元、气候分异、人类活动等因素均值得关注。尤其是人类活动统计指标的降尺度,可能是理解不同空间统计单元中关键景观组分对热岛效应驱动力存在差异的重要归因方式。首先,不同研究中对城市热环境的表征采用 UHI 或 LST 为因变量,但实质上只要郊区的温度背景值相同,该背景值作为常数项并不会影响统计结果;而在多城市样本中郊区背景值各异

的情况下,UHI 和 LST 在回归方程中不能相互替换。其次,传统的景观组分参数往往为各种用地类型的比例,而近年来大量应用的 NDVI、ISA 等生物物理参数具有与用地类型比例相似的特点,也可以用于描述景观组分,但并不具有相互替代性。例如,冬季的林地、草地面积百分比与 NDVI 值并不一定高度对应;NDWI 将山体阴影显示为高值,也易于和真实的水体面积百分比存在冲突。再次,统计单元对关联规律的影响不仅体现在统计单元的面积上,更反映在统计单元的划区方式上,矩形、流域、行政区等不同空间形态的单元可能引致明显分异的统计结果。同时,植被在低纬度地区降温、高纬度地区升温的规律是否能在不同城市的案例中得到体现也值得关注。最后,相比于气候背景,城市化方式及强度对 UHI 与城市景观组分关联规律的影响尚未得到足够重视;将景观组分作为控制变量,探讨人为热排放对城市热岛的影响,成为解析地表反射率与人为热排放对城市热岛效应贡献关系的有效途径。

针对不同城市研究案例中出现的景观组分与热岛效应关联特征的显著差异,有必要明确城市区位、观测尺度、季相时间等多种变量对该关联规律造成的影响。其中,不仅需要区分各气候带城市热岛效应与景观组分关联规律的差异性,还需要进一步甄别该关联规律在不同城市发展阶段的响应特征差异,因而以下科学问题值得重点回应:NDVI 与 LST 的关联特征是否存在纬度差异性? 沿海、沿江城市水体的降温效用是否与内陆城市的水体景观一致? ISA 与 LST 的关联特征是否与城市发展程度、类型有关? 在城市快速扩展前期与后期的 UHI 与景观组分的关联特征有何差异? 如若关联特征的显著性判定存在变化,则临界点所对应的控制变量阈值如何识别?

4 UHI 与空间构型的关联:明晰代表性指数

4.1 构型指标关联特征

尽管不同景观组分的地表反射率差异和蒸散过程强弱是影响热量传输、决定城市热岛强度的主要因素,但考虑到热力过程的空间流动性,局地景观所吸收或释放的热量可能对周边景观的温度有所影响,从而体现出景观空间构型对城市热岛效应影响的研究重要性。除对景观组分及其特征参量的刻画外,一些研究开始关注景观空间分布形态的热力学意义,通过景观格局指数分析景观空间构型与热岛效应的关系,提取出影响热岛效应的关键空间构型指标[31,33-34,55]。在识别景观组分与热岛效应关联特征基础上,以描述面积-周长、形状、集聚、多样性为主的数十个景观空间构型指标与热岛效应关联规律的刻画已在中国不同城市予以开展(表 3)。其中,大多数研究以 LST 替代 UHI 进行相关与回归分析。正如前文所述,在郊区背景值固定的前提下,LST 与 UHI 在回归中仅存在常数项的差别,不会影响回归系数。值得一提的是,一些研究将 UHI 反向取值,将绿地水体的降温效果命名为城市冷岛效应,从而为公园绿地的空间形态规划与设计提供定量参考。

以北京、上海为主的不同城市研究结果表明,最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、景观集聚度(CONTAG)与 LST 显著相关[33-34,60-61]。然而,即使针对同一城市,仍有一些研究结果显示出完全相反的结论。在北京一个采样粒度变化的研究案例中,只有景观破碎度(PD)在各个粒度均与 LST 显著相关[60];在上海夏季的研究案例则显示 LSI、PD 等指数与 LST 无关。在对绿地景观空间构型与降温效应的关联分析中,一些研究发现了形状简单、分布集中的绿地斑块降温效果更佳的规律[55,62-63],但也有研究得出了形状复杂而分散的绿地温度更低、降温效果更强的结论[64-65]。因此,景观空间构型驱动热岛效应的贡献率仍不明晰,关键景观空间构型指标亟待明确。

4.2 构型关联规律解析

从规模、组分到构型的景观格局与热岛效应关联研究并非相互并列,而存在着递进关系。引入空间构型因子,可以更好的解读在特定规模的某一城市中景观组分与热岛效应回归参数未能解释的部分。在规模、组分因子对景观数量、质量特征参数进行描述的基础上,对景观空间构型的刻画增加了景观空间组织关联对热岛效应的影响,使景观格局对热岛效应的影响成为数量-质量-空间多维驱动。同时,三者之间又强弱有序,在整体的城市规模和景观组分热传递质量下,强调局部景观空间联系的热环境效应方能凸显其意义。对应于多

数研究关注景观组分对热岛效应的影响程度,对景观空间构型驱动力的关注成为立足景观生态学视角研究热岛效应的重要学科贡献。

表 3　城市景观空间构型与热岛效应的关联研究对比

Table 3　Comparison of the relationships between spatial configuration and UHI

文献 References	城市 City	典型关联要素 Key related indicator	关联关系 Relationship
Li 等[31]	上海	CONTAG、LSI、SHEI 等	夏季 LST 与 CONTAG、SHEI 相关,春季 LST 与所有指数均相关
Zhou 等[33]	Baltimore (USA)	LPI、ED、CIBuild 等	LST 与 LPI、ED 两个指数相关性最高,建筑和街道反映的规律一致
Chen 等[60]	北京	PLAND、LSI、Gyrate_MN 等	PLAND 等组分解释 56%,LSI 和 Gyrate_MN 两个指标可以增加 6%—12%的解释率
Sun 和 Chen [61]	北京	LSI	与冷岛强度负相关
Li 等[60]	北京	PD、ED、LSI 等	只有 PD 与 LST 在 2.44—30m 的三种影像分辨率中均呈显著相关
Li 等[62]	北京	PD、PLAND、LSI 等	绿地 LST 与 PLAND 负相关,与 PD 正相关,与 LSI 不相关
Peng 等[55]	北京	PD、ED	生态用地的 PD 和 ED 与热岛效应正相关
徐丽华和岳文泽[64]	上海	Perimeter、Perimeter/Area	Perimeter 与公园降温效应负相关,Perimeter/Area 与公园降温效应成正相关
冯悦怡等[65]	北京	公园、绿地形状指数	公园内部温度与绿地形状指数显著负相关,但与公园外围形状指数显著正相关
陈爱莲等[66]	北京	PLAND、LPI、DIVISION 等	LPI、DIVISION、相似邻接百分比、分散与并列指数与四季温度显著相关
岳文泽和徐丽华[67]	上海	SHDI	多样性越大则温度越高
祝善友等[68]	苏州	AI、CONTAG、SHDI 等	LST 变异程度增大的区域 AI、CONTAG 变小,SHDI 变大
朱春阳[69]	武汉	LSI	与湿地温度显著正相关
徐双等[63]	长沙	PD、LPI、AI 等	优势度大、分布集中的生态用地降温,斑块大、凝聚度高、形状规整的建设用地升温

PLAND:景观组成百分比,Percentage of Landscape;Gyrate_MN:平均回转指数,Mean Radius of Gyration;PD:斑块密度,Patch Density;ED:边缘密度,Edge Density;LPI:最大斑块指数,Largest Patch Index;LSI:景观形状指数,Largest Shape Index;DIVISION:分离度,Landscape Division Index;AI:集聚指数,Aggregation Index;CONTAG:景观集聚度,Contagion;CIBuild:建筑斑块凝聚度,Cohesion Index for Building Patch;SHDI:香农多样性,Shannon′s Diversity Index;SHEI:香农丰富度,Shannon′s Evenness Index;Perimeter: 周长;Perimeter/Area: 周长面积比

鉴于研究结果间的相互冲突,景观空间构型与热岛效应的关联规律尚无定论,对控制变量厘定、特征尺度遴选、关键指数析取的探索有必要继续强化。首先,景观空间构型对城市热岛效应的影响一般弱于景观组分、气候条件乃至一些社会经济指标,在未剥离其他变量的前提下直接对景观空间构型与温度进行相关性分析,显著性统计结果容易具有偶然性。其次,景观空间构型指标随统计尺度存在较为明显的变异,而城市主城区及内部功能区的大小并不固定,因而每个城市应有其特定的统计尺度,需要在研究中予以强调。最后,各类型景观格局指数具有较高的相关性,虽然采用穷举的方式可以筛选出统计意义上相关程度最高的变量,但如何理解统计结果所对应的形态学内涵显然更具挑战。因此,采用富有鲜明形态学特征的景观空间构型指标带入模型,可以更有效的帮助研究者理解统计结果所蕴含的形态学意义。

由于不同城市中景观组分指标与热岛效应的关系本身存在差异,导致了景观组分驱动热岛效应的贡献率存在时空差异;在景观组分和空间构型共同驱动城市热岛效应的理论假设下,空间构型驱动热岛效应的贡献率因而也并不恒定。因此,景观空间构型与城市热岛效应的关联研究仍有待深入,有必要关注以下重点科学问题:在厘定空间构型对热岛效应的驱动作用时,如何剥离其他景观属性的影响?如何在众多空间构型指标中析取关键指标?不同采样粒度和幅度怎样影响这一贡献率的取值?相同面积规模下,增温景观的斑块分布是否越聚集越有助于热岛效应的增强,是否斑块形状越简单热岛效应越强?如何将景观空间构型对城市热岛效应的贡献率识别结果与城市绿色基础设施规划相对接?

值得强调的是,虽然在城市绿地、水体与周边建设用地的反向 UHI,即“冷岛效应”被逐渐认知并强调的

背景下[61,64-65],所识别的景观空间构型参数可以成为城市地域绿色基础设施空间形态规划的重要依据[70],但使用过于复杂的指数可能会降低实践意义。由于并非所有通过显著性检验的构型参数均具有对接景观规划的应用价值,景观空间构型指标的应用前景是空间构型与 UHI 关联研究必须重视的议题。

5 UHI 与景观格局关联研究展望:阈值析取

5.1 阈值研究意义

总结近今研究进展,可见城市规模、景观组分、空间构型因素对城市热岛效应的影响均未形成普适性规律,而存在于气候、时相、季相、城市类别等参数控制条件之下。即使就特定城市而言,同一景观格局也可以对应不同天气条件下的多种温度,景观格局与热岛效应的关系并不具有唯一性。因此,关注不同控制变量下景观格局对热岛效应影响可能存在的贡献率波动范围,比单纯界定影响的显著性更具应用价值。

就城市规模而言,这一阈值可以是在气候带、社会经济条件等背景变量一致时,城市规模与热岛效应相关联的上下限。例如,Tan 和 Li 发现在京津冀地区大于 $2km^2$ 的建成区中存在热岛效应与建成区面积的显著相关[47];则 $2km^2$ 可以作为该区域的一个规模阈值。就景观组分而言,阈值可以是特定城市中景观类型的成分或者生物物理参数显著影响热岛效应的取值范围。在全样本中与热岛效应相关性较低的景观组分参数可能在某一部分样本中与热岛效应高度相关。例如,Peng 等对北京市的研究表明,当生态用地占样本总面积 70% 以上时,景观的降温效应明显提升[55];则 70% 可以作为该区域的一个组分阈值。同理,在城市内部特定的研究尺度和景观组分区间下,可以厘定空间构型参数显著影响热岛效应的取值范围。但由于空间布局参数的刻画受采样尺度影响较大,该阈值是否能被识别到并是否有应用价值尚有待进一步验证。总之,通过全面明晰城市景观格局中的规模、组分、构型要素与城市热岛的关联,提取各景观格局要素所对应的关键阈值,可以为城市绿色基础设施的建设规模、成分、形态提供定量化依据,直接服务于城市景观规划的现实需求[71]。

5.2 阈值析取途径

区域气候主导的城市温度背景值的差异性和城市化主导的局地人为热排放差异性,是引致景观格局与城市热岛关联区域分异的两大主要因素,也是关联阈值析取所关注的焦点。国家或区域尺度上,城市规模、景观组分与热岛效应的关系是否存在纬度区间、社会经济区间,局地城市景观空间构型与热岛效应的关系是否存在规模、组分区间,可以成为关联阈值析取研究的两项重要内容。在固定区间内识别景观格局参数对城市热岛效应的贡献率上限和下限,即可得到景观格局对热岛效应的影响阈值。如图 1 所示的研究框架示例,遴选代表性景观格局参数并采用合理的相关分析和回归分析方法,可以有效明确景观格局对热岛效应的影响强度,并根据不同样本所展示的时空规律差异性提取相应阈值。该阈值不仅有助于进一步明晰城市化进程中景观格局演变的生态环境效应形成机理,也可与城市规划直接对接形成服务于城市热岛效应缓解的景观优化策略。

首先,针对城市规模与热岛效应的昼夜关联规律受气候、社会经济条件、城市建成区规模影响导致关联阈值难以确定的科学问题,可以提取全国大城市如地级以上城市热岛效应作为基础数据。借助 MODIS 卫星 LST 产品分析全国大城市热岛效应的空间格局、时间演化、季相和昼夜差异特征[72]。在划分气候带的基础上,判断城市规模与热岛效应在各个年份的空间关联规律以及在各个城市的时间关联规律,并判断城市人口分布、经济总量、产业结构等城市化指标是否会影响该规律。通过界定水热特征参数和城市化等级区间,明确在各区间下城市规模显著影响城市热岛效应的参数取值范围,即得到城市规模阈值。

其次,针对不同水热条件、不同城市化阶段下景观组分参数与 LST 关联特征的一致性不明且未考虑阈值等关键问题,有必要提取 NDVI、NDBI、NDWI、ISA 等代表性景观组分参数重点分析。这一分析流程可以分为两种方式:一是在特定气候条件下选择多个城市,利用 MODIS LST 产品分析城市整体的景观组分参数与热岛的相关性。其优势在于可以对应城市规模进行昼夜或年际分析,缺陷在于空间分辨率所限,不易刻画城区内部景观格局;二是仅选择某一个代表性大城市,借助 Landsat 热红外波段等中高分辨率遥感影像,对主城区内

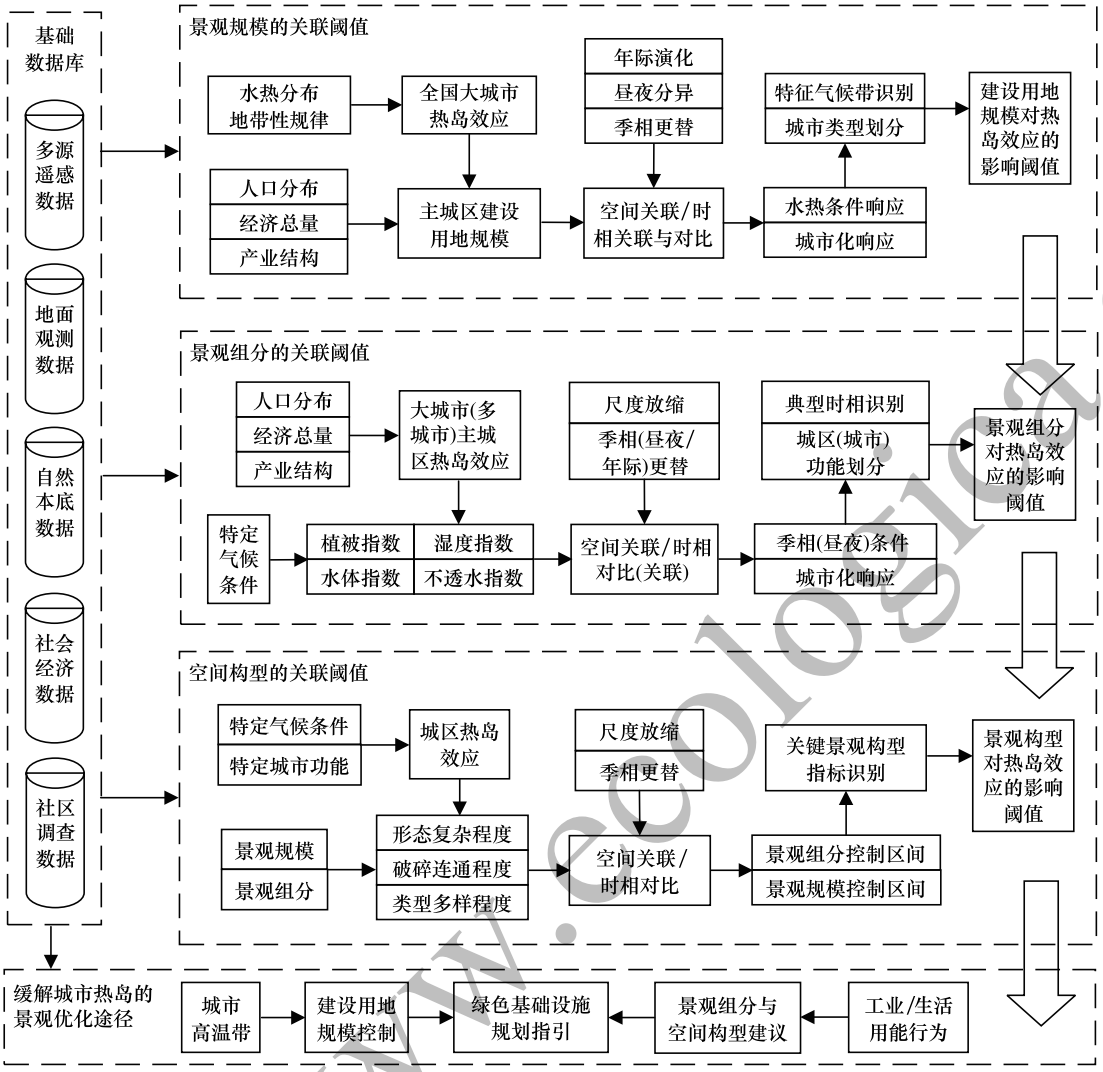


图 1　景观格局与城市热岛效应关联阈值提取框架

Fig.1　The framework of extracting correlation thresholds between landscape patterns and UHI

部景观组分进行多尺度统计。通过界定城市功能区片,降低人为热排放的干扰,明确各区片内部多种景观组分显著影响城市热岛效应的参数取值范围,即得到景观组分阈值。

再次,针对剥离其他景观格局属性影响、析取关键构型指标、厘定关联特征对不同采样粒度和幅度的响应、明晰斑块分布与形状对热岛效应的影响规律等关键问题,需要在气候背景、城市功能较为一致的城区内部开展以下研究工作:计算常用景观格局指数定量表征景观连通性、多样性、形状复杂性等构型参数作为数据基础;在关注尺度放缩与季相更替造成差异的前提下,厘定样本中相对一致的景观组分区间;在该区间内遴选常用景观格局指数,揭示关联性较强的景观指数显著影响城市热岛效应的参数取值范围,即得到空间构型阈值。

最后,将所提取的城市规模、景观组分和空间构型阈值与城市规划对接,可以有效指引城市在不同尺度上的高温风险防范途径。尤其是在我国大城市空间扩张速度较快的背景下,城市规模阈值识别结果可以服务于大城市群的城市高温带研究,作为面向城市群高温防范的城市规模管控依据;根据景观组分阈值,可以得出大城市缓解热岛效应的城区绿地、水体与建设用地有效面积配比,结合空间构型阈值与社区用能及热排放,可以明晰社区尺度的最优降温景观设计方式,为绿色基础设施空间规划提供科学指引;从而实现城市景观格局与热岛效应关联研究结果的实践应用,为中国城市适应气候变化提供科学、定量的景观规划途径。

http://www.ecologica.cn

参考文献(References):

[1] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.

[2] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003, 423(6939): 528-531.

[3] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.

[4] Mirzaei P A, Haghighat F. Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. Building and Environment, 2010, 45(10): 2192-2201.

[5] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353.

[6] Smargiassi A, Goldberg M S, Plante C, Fournier M, Baudouin Y, Kosatsky T. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. Journal of Epidemiology & Community Health, 2009, 63(8): 659-664.

[7] Tan J G, Zheng Y F, Tang X, Guo C Y, Li L P, Song G X, Zhen X R, Yuan D, Kalkstein A J, Li F R, Chen H. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. International Journal of Biometeorology, 2010, 54(1): 75-84.

[8] Lowe S A. An energy and mortality impact assessment of the urban heat island in the US. Environmental Impact Assessment Review, 2016, 56: 139-144.

[9] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1219-1228.

[10] 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.

[11] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 苏常红, 姚雪玲, 刘宇. 国际景观生态学研究新进展. 生态学报, 2008, 28(2): 798-804.

[12] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.

[13] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1-10.

[14] 彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 赵志强, 宋治清, 王仰麟. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究: 回顾与展望. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1186-1196.

[15] 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. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.

[16] Kaloustian N, Diab Y. Effects of urbanization on the urban heat island in Beirut. Urban Climate, 2015, 14: 154-165.

[17] Noro M, Lazzarin R. Urban heat island in Padua, Italy: simulation analysis and mitigation strategies. Urban Climate, 2015, 14: 187-196.

[18] Tan Z, Lau K K L, Ng E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. Energy and Buildings, 2016, 114: 265-274.

[19] Mirzaei P A. Recent challenges in modeling of urban heat island. Sustainable Cities and Society, 2015, 19: 200-206.

[20] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Tarver Jr G, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.

[21] Landsberg H E. The Urban Climate. New York: Academic Press, 1981: 21-22.

[22] Oke T R, East C. The urban boundary layer in Montreal. Boundary-Layer Meteorology, 1971, 1(4): 411-437.

[23] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.

[24] Rao P. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53: 647-648.

[25] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, Chi W F, Liu A L, Liu Y, Zhang R H, Liu J Y. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(1): 113-130.

[26] 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.

[27] 刘越, Goto S, 庄大方, 匡文慧. 城市地表热通量遥感反演及与下垫面关系分析. 地理学报, 2012, 67(1): 101-112.

[28] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 王亚力. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例. 地理学报, 2013, 68(11): 1461-1471.

[29] Clinton N, Gong P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: global locations and controls. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 294-304.

[30] Zhao L, Lee X, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. Nature, 2014, 511(7508): 216-219.

[31] 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.

[32] Li X X, Li W W, Middel A, Harlan S L, Brazel A J, Turner B L. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: combined effects of land composition and configuration and cadastral-demographic-economic factors. Remote Sensing of

Environment, 2016, 174: 233-243.

[33] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(1): 54-63.

[34] Chen A L, Yao L, Sun R H, Chen L D. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? Ecological Indicators, 2014, 45: 424-433.

[35] Jin K, Wang F, Chen D L, Jiao Q, Xia L, Fleskens L, Mu X M. Assessment of urban effect on observed warming trends during 1955-2012 over China: a case of 45 cities. Climatic Change, 2015, 132(4): 631-643.

[36] Liu K, Su H B, Zhang L F, Yang H, Zhang R H, Li X K. Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4804-4833.

[37] Lu D M, Song K S, Zang S Y, Jia M M, Du J, Ren C Y. The effect of urban expansion on urban surface temperature in Shenyang, China: an analysis with Landsat imagery. Environmental Modeling & Assessment, 2015, 20(3): 197-210.

[38] Wang J, Huang B, Fu D J, Atkinson P M. Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated determinants across major Chinese cities. Remote Sensing, 2015, 7(4): 3670-3689.

[39] Wang X M, Sun X G, Tang J P, Yang X Q. Urbanization-induced regional warming in Yangtze River Delta: potential role of anthropogenic heat release. International Journal of Climatology, 2015, 35(15): 4417-4430.

[40] Shen H F, Huang L W, Zhang L P, Wu P H, Zeng C. 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. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 109-125.

[41] Zhao S Q, Zhou D C, Liu S G. Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity. Environmental Pollution, 2016, 208: 118-124.

[42] Oke T R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), 1973, 7(8): 769-779.

[43] Tran H, Uchihama D, Ochi S, Yasuoka Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8(1): 34-48.

[44] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504-513.

[45] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 696-703.

[46] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, Zhang L X, Zhu C. Surface urban heat island in China's 32 major cities: spatial patterns and drivers. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 51-61.

[47] Tan M H, Li X B. Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas. Habitat International, 2015, 49: 100-106.

[48] Ma Y, Kuang Y Q, Huang N S. Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2): 110-118.

[49] Guo G H, Wu Z F, Xiao R B, Chen Y B, Liu X N, Zhang X S. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. Landscape and Urban Planning, 2015, 135: 1-10.

[50] Heinl M, Hammerle A, Tappeiner U, Leitinger G. Determinants of urban-rural land surface temperature differences—a landscape scale perspective. Landscape and Urban Planning, 2015, 134: 33-42.

[51] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3995-4004.

[52] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 邱全毅. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631.

[53] 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.

[54] 阳文锐, 李锋, 何永. 2003-2011 年夏季北京城市热景观变化特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4390-4399.

[55] 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.

[56] Chen X L, Zhao H M, Li P X, Yin Z Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-146.

[57] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3): 375-386.

[58] Li Y Y, Zhang H, Kainz W. Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: using time-series of Landsat

TM/ETM+ data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 19: 127-138.

[59] 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.

[60] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: what are the effects of spatial resolution? Landscape and Urban Planning, 2013, 114: 1-8.

[61] Sun R H, Chen L D. How can urban water bodies be designed for climate adaptation? Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1-2): 27-33.

[62] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y, Xu W H, Zheng H. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. Landscape Ecology, 2012, 27(6): 887-898.

[63] 徐双, 李飞雪, 张卢奔, 周磊. 长沙市热力景观空间格局演变分析. 生态学报, 2015, 35(11): 3743-3754.

[64] 徐丽华, 岳文泽. 城市公园景观的热环境效应. 生态学报, 2008, 28(4): 1702-1710.

[65] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3179-3187.

[66] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2077-2086.

[67] 岳文泽, 徐丽华. 城市土地利用类型及格局的热环境效应研究——以上海市中心城区为例. 地理科学, 2007, 27(2): 243-248.

[68] 祝善友, 张桂欣, 刘莹. 苏州下垫面格局演变及其局地热环境效应. 地理科学, 2012, 32(7): 859-865.

[69] 朱春阳. 城市湖泊湿地温湿效应——以武汉市为例. 生态学报, 2015, 35(16): 5518-5527.

[70] Norton B A, Coutts A M, Livesley S J, Harris R J, Hunter A M, Williams N S G. Planning for cooler cities: a framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. Landscape and Urban Planning, 2015, 134: 127-138.

[71] Wu J G, Xiang W N, Zhao J Z. Urban ecology in China: historical developments and future directions. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 222-233.

[72] 李元征, 尹科, 周宏轩, 王晓琳, 胡聃. 基于遥感监测的城市热岛研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(9): 1062-1074.

http://www.ecologica.cn