

# 秋冬季节广州城市绿地对 热岛效应的调控作用差异分析\*

王刚<sup>1,2,3</sup>, 张秋平<sup>4</sup>, 肖荣波<sup>2</sup>, 管东生<sup>3</sup>

- (1. 广东工业大学管理学院, 广东 广州 510520;
2. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045;
3. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;
4. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 城市绿地具备“冷岛”效应功能, 其在调控城市热岛效应方面发挥着独特作用, 是城市生态研究的重要领域。以 Landsat 8 多光谱和热红外波段遥感影像为基础, 系统分析了秋冬季节广州市地表参数比如植被覆盖度、归一化湿度指数 (NDMI) 和减化比值植被指数 (RSR) 变化对地表温度的影响; 并综合绿地地表参数信息, 定量研究了城市绿地面积和周长变化对其热环境调控功能的影响及其季节性差异。结果表明: 广州秋季热岛强度和范围大于冬季; 相比冬季, 秋季地表参数与地表温度间具有更好的相关性, 即秋季植被有更好降温效应。但是 RSR 与地表温度间呈对数函数关系, 说明在高植被覆盖区降温效应可能出现“饱和现象”。秋冬季节城市绿地降温效应的影响距离为 300 m 左右。城市绿地面积和周长与地表温度间显著负相关, 但秋季相关性小于冬季。绿地属性参数与地表温度间显著负相关, 秋季相关性更强。然而, 相关分析发现, 除秋季绿地 NDMI 与内外累积温差间显著负相关外, 其它地表参数与秋冬季节内外累积温差之间的显著性并不明显, 这一程度说明绿地地表参数可能并不直接影响外部环境温度。

**关键词:** 热岛效应; 城市绿地; 植被覆盖度; 归一化湿度指数; 减化比值植被指数

**中图分类号:** P951; X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 05-0038-11

## Thermal island regulation differences of urban green spaces between autumn and winter in Guangzhou, South China

WANG Gang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qiuping<sup>4</sup>, XIAO Rongbo<sup>2</sup>, GUAN Dongsheng<sup>3</sup>

- (1. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;
2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China;
3. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
4. School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Urban heat island (UHI) has been mostly reported as the consequence of accelerated urbanization and industrialization. UHI can be obviously regulated by the cooling-island effect of urban green spaces. Thus, growing attention has been paid to understanding the cooling regulation mechanism of urban green spaces. Land surface temperature (LST), vegetation cover, normalized difference moisture index (NDMI), reduced simple ratio (RSR), and urban green spaces in Guangzhou were retrieved using Landsat-8 images in autumn and winter. This study focused on the correlation relationships between LST and land surface attributes (such as vegetation cover, NDVI, and RSR) in autumn and winter, and also

\* 收稿日期: 2017-06-19

基金项目: 广州市科技计划项目 (201707010142); 国家自然科学基金 (51039007); “十二五”国家科技支撑计划重点项目 (2012BAC13B01)

作者简介: 王刚 (1983年生), 男; 研究方向: 区域环境与生态研究; E-mail: gdut\_tony@163.com

paid much attention to know how LST was affected by urban green spaces as urban green spaces varied in area and parameter and land surface attributes. The results showed that both UHI magnitude and area are much higher in autumn than in winter. Compared with winter, there was better correlation relationship between land surface attributes and LST in autumn, indicating that better cooling effect could be existed in autumn with higher temperature. However, logarithmic function relationship was existed between LST and RSR. It was indicated that cooling effect of vegetation could be at “saturation” as RSR used, when vegetation cover increased. LST exponentially decreased with buffer distance increased. Cooling effect of urban green spaces was gradually limited, when buffer distance continued to be increased as buffer distance is greater than 300 meters. Cooling effect of urban green spaces was much stronger in autumn than in winter. Furthermore, LST was also negatively correlated with both the area and parameter of urban green spaces and higher correlation coefficient occurred in winter. There was significant correlation relationship between internal LST and land surface attributes of urban green spaces and higher correlation coefficient occurred in autumn. LST difference between internal and external green spaces was not significantly correlated with vegetation cover and RSR in both autumn and winter, except for NDMI in autumn. LST was not directly affected by vegetation cover and RSR. Generally, cooling effect of urban green spaces was obviously better in autumn.

**Key words:** urban heat island; urban green space; vegetation cover; normalized difference moisture index; reduced simple ratio.

自工业革命以后,全球城市化进程加速,城市人口比例已超过50%,到2050年将超过60%<sup>[1]</sup>。据《国家人口发展规划(2016-2030年)》,2015年中国常住人口城镇化率已达56%,规划至2030年达到70%。在城市化进程中,半自然或者人工生态系统取代自然生态系统,下垫面性质显著改变<sup>[2]</sup>;城市人口不断集聚,大量能源集中消费释放,导致城市热岛效应影响范围扩大和强度增加<sup>[3-5]</sup>。城市热岛效应可直接影响区域大气环流格局的变化,增强城市能源消费强度,加剧大气环境污染风险,制约城市人居环境的改善<sup>[6]</sup>;并且在全球变暖背景下,城市热岛效应强化了城市极端高温强度和范围,导致居民的高温健康风险上升<sup>[7]</sup>。城市热岛效应已成为21世纪全球面临的重要生态环境问题之一,如何缓解城市热岛效应备受关注。

在城市不同类型下垫面中,绿地可通过植被的蒸腾和蒸散过程增湿降温,促进改善区域热环境和微气候,是缓解热岛效应中的关键性生物要素<sup>[8-10]</sup>。在区域或城市尺度上,目前关于城市绿地缓解热岛效应的研究主要集中在两个方面:一方面是研究城市绿地表征参数比如植被覆盖度、减化比值植被指数(RSR)、归一化植被指数(NDVI)与地表温度间的相关关系,探讨绿地质量变化对城市热岛效应的影响<sup>[11-13]</sup>;另一方面是研究城市绿地(或林地)面积比例、以及绿地斑块周长、面积、几何形态和空间配置等景观格局特征对城市绿

地的降温强度与降温范围定量影响<sup>[14-16]</sup>。近年来,国内外研究者开始关注到城市绿地对热岛效应的调控功能受季节性变化影响<sup>[14, 17]</sup>。值得注意的是,当前大部分研究较多关注绿地单方面因素比如绿地质量或者景观格局特征变化等对城市热岛格局形成的影响,忽略了绿地质量和景观格局的综合影响。

广州市作为改革开放的华南门户,其经济社会发展取得瞩目成就,已跻身国家5大中心城市之一。广州市作为“花城”,尽管历来重视城市绿地的规划与建设,但由于城市快速扩张、人口过快增长等因素的影响,导致其热岛效应问题突出。因此,开展城市绿地对热岛效应调控功能影响的研究具有现实需要。本研究利用2014年10月(秋季)和2015年1月(冬季)的Landsat 8多光谱和热红外波段影像,基于遥感技术提取绿地表征参数比如植被覆盖度、RSR、归一化湿度指数(NDMI)以及地表温度(LST)等信息,分析秋冬季节绿地表征参数与地表温度间的相关关系;在此基础上,探讨研究城市绿地的周长和面积以及表征参数对绿地降温强度和范围的综合影响,以期进一步揭示绿地降温规律及机制。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 数据来源及预处理

本研究选取2014年10月15日和2015年1月19日的Landsat 8多光谱和热红外波段影像,成像

时云量为 0%，地面特征清晰。2014 年 10 月 15 日，最高气温 30 °C，最低气温 17 °C，代表秋季；2015 年 1 月 19 日，最高气温 20 °C，最低气温 8 °C，代表冬季。遥感影像处理利用遥感图像处理软件平台 ENVI 5.1，以及地理信息系统软件平台 ArcGIS 10.0。其中，利用 ENVI 5.1 对热红外波段除外的其它波段进行辐射定标和大气校正。

## 1.2 地表参数的提取

基于 Landsat 8 遥感影像，提取的地表参数包

括植被覆盖度 ( $f_v$ )、减化比值植被指数 (RSR)、归一化湿度指数 (NDMI) 以及地表温度 (LST) 等。其中,  $f_v$  可综合反映不同像元内植被生长状况、覆盖类型及其状态等; NDMI 往往是城市下垫面性质变化的综合反映, 是与城市热岛调控有关重要解释性指标; RSR 是综合了植被结构和地表湿地的植被指数, 其与城市热岛的调控密切相关。相应的提取方法见表 1。

表 1 城市主要地表参数的提取公式

Table 1 Retrieval formula of land surface parameters in urban regions

地表参数	使用公式	参考文献
$f_v$	$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}}$ $f_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} + \text{NDVI}_{\text{min}}}$	[18-19]
NDMI	$\text{NDMI} = \frac{\rho_{\text{mir}} - \rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{mir}} + \rho_{\text{nir}}}$	[20]
RSR	$\text{RSR} = \frac{(\rho_{\text{mir} \cdot \text{max}} - \rho_{\text{mir}})\rho_{\text{nir}}}{(\rho_{\text{mir} \cdot \text{max}} - \rho_{\text{mir} \cdot \text{min}})\rho_{\text{red}}}$	[13]
LST	$L_\lambda = 0.0003342Q_{DN} + 0.1$ $TB = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda + 1)}$ $\text{LST} = \frac{\rho TB}{\rho + \lambda TB \ln \varepsilon} - 273.15$	[16, 21]

表中公式符号含义为,  $\rho_{\text{mir}}$  表示中红外波段反射率 (即 Landsat 8 多光谱波段第 7 波段),  $\rho_{\text{nir}}$  表示近红外波段反射率 (即 Landsat 8 多光谱波段第 5 波段),  $\rho_{\text{red}}$  是红光波段反射率 (即 Landsat 8 多光谱波段第 4 波段),  $\rho_{\text{mir} \cdot \text{max}}$  和  $\rho_{\text{mir} \cdot \text{min}}$  分别表示中红外波段反射率的最大值和最小值;  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  和  $\text{NDVI}_{\text{min}}$  分别表示完全植被覆盖像元和裸土像元的归一化植被指数的最大值和最小值;  $L_\lambda$  为下垫面的辐射值,  $Q_{DN}$  为 Landsat 8 热红外波段第 10 波段灰度值;  $K_1$  和  $K_2$  为发射前预设常量, 其值分别为  $774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  和  $1321.08 \text{ K}$ ;  $\lambda$  为热红外波段的中心波长, 取值  $10.9 \mu\text{m}$ ;  $\rho = 0.01438 \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $\varepsilon$  为地物比辐射率。

将反演出的秋冬季节城市地表温度按照均值 - 标准差法, 根据相应季节地表温度的均值 - 标准差将研究区的地表温度按等级分为高温区、次高温

区、中温区、次中温区和低温区五大类。

## 1.3 城市绿地选取、缓冲区与公里格网温度效应分析

为全面分析秋冬季节城市植被覆盖度、RSR、NDMI 以及城市绿地面积和周长对热岛效应调控功能的影响, 本研究利用 Google Earth 遴选出城市建成区内面积大于  $500 \text{ m}^2$  的公园, 共计 95 个 (如图 1), 并利用 GIS 计算出所有选取城市绿地面积和周长, 定量研究城市绿地面积和周长变化对其热岛效应调控功能的影响, 并结合 GIS 技术, 分别对每一城市绿地设置 100, 200, …, 800 m 的缓冲区, 提取缓冲区内的地表温度, 定量分析城市绿地对周围热环境的调控作用。同时, 利用 GIS 设置  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的网格, 并提取每个方格内的植被覆盖度、RSR 和 NDMI 以及地表温度等数据, 分析其与地表温度的定量关系。

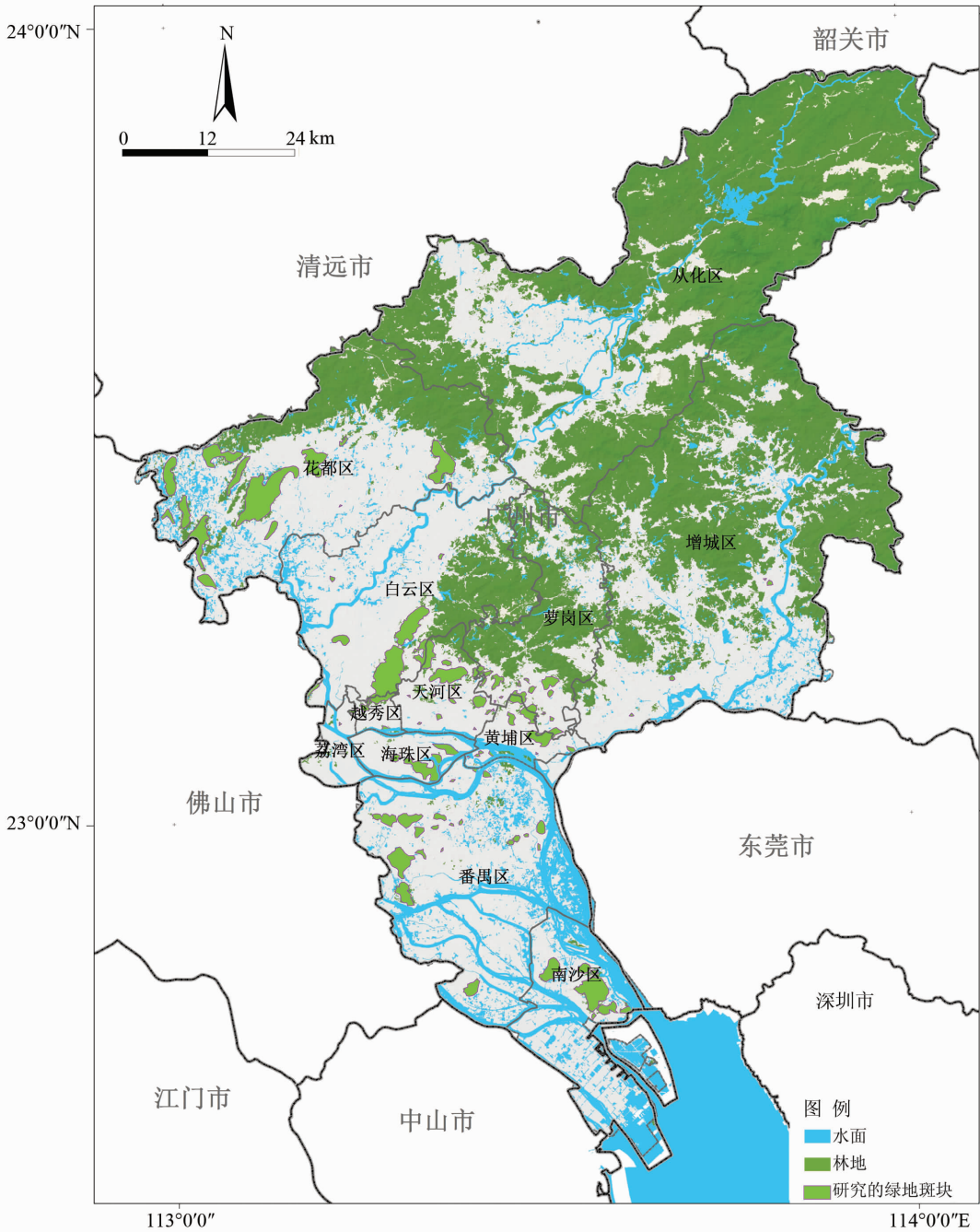


图 1 广州选取的研究绿地斑块分布图

Fig. 1 Distribution of studied green spaces in Guangzhou

## 2 结果与分析

### 2.1 秋冬季节地表温度变化

从图 2 和表 2 可以看到，相比冬季，广州市秋季的热岛强度与高温区分布面积均呈现增大趋势。秋季平均地表温度和最高地表温度分别为 24.13 °C 和 42.04 °C；冬季平均地表温度和最高地表温度分别为 15.48 °C 和 33.80 °C。与冬季相比，秋季高温

区面积大幅增加 56.99%，次高温区面积增长 6.18%，而低温区大幅减少 66.54%，这在一定程度说明随着大气温度的升高将加剧城市热岛强度和范围。在上海、北京和武汉的相关研究结果也表明，城市热岛强度和范围具有显著的季节差异性<sup>[22-24]</sup>，并且北方城市冬季热岛效应通常不明显<sup>[16]</sup>。影响广州市秋冬季节热岛强度和范围差异的因素主要有两方面，一方面是秋冬季节光照强度

的差异, 导致城区和郊区下垫面增温效果的不同<sup>[25]</sup>。相比冬季, 广州市秋季具有较高的光照强度和气温, 具有低植被覆盖、弱透水性的城区下垫面热惯性小, 导致秋季城区增温效果更加明显; 同时, 具有高植被覆盖度、高土壤含水量的郊区下垫面热惯性大, 气温和光照强度增加时可在一定程度上强化植被的光合作用以及蒸腾和蒸散过程, 使得

秋季郊区的降温效果强于冬季。另一方面, 广州市人为热排放也会对热岛强度产生影响<sup>[22]</sup>。10 月份秋季的广州天气依然相对炎热, 加上城市热岛效应的强化作用, 一定程度增加了居民和第三产业空调的使用率, 引起人为热排放增加, 进而导致城区和郊区的温度差异增强<sup>[24]</sup>。

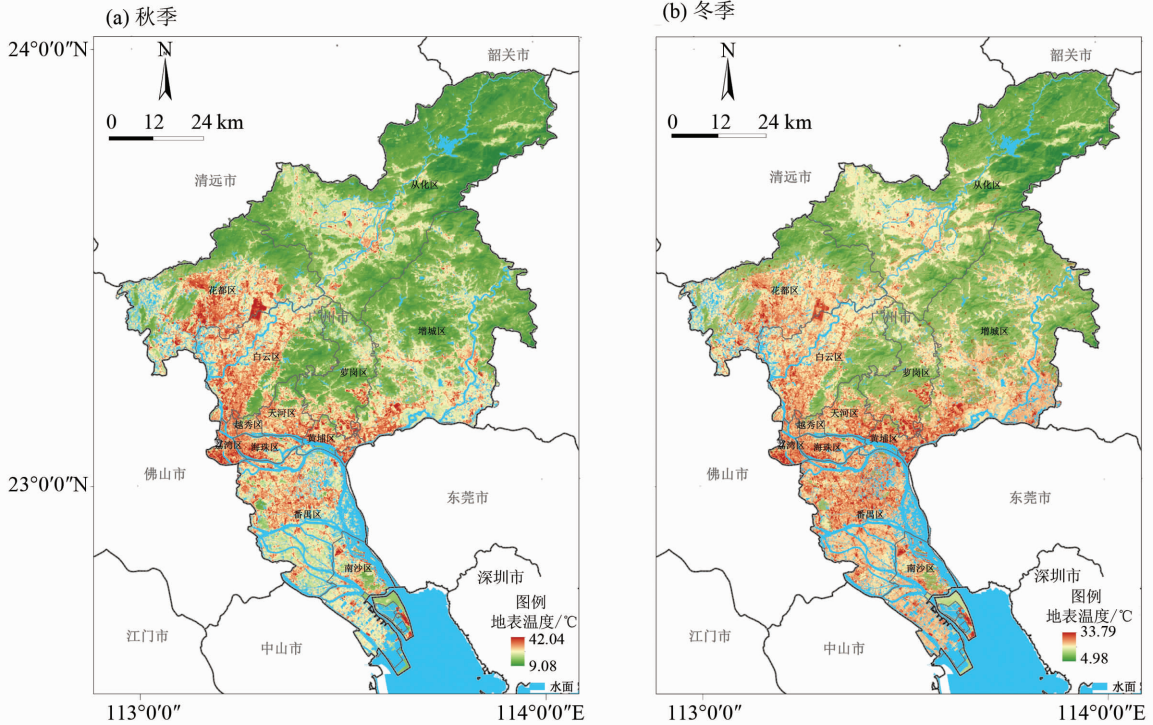


图 2 秋季和冬季地表温度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land surface temperature in both autumn and winter

表 2 不同温度等级区面积统计

Table 2 Area and ratios of different five different-range temperature categories

温度等级	秋季		冬季	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低温区	64.83	0.87	193.26	2.60
次中温区	883.49	11.88	859.19	11.56
中温区	5 223.37	70.26	5 289.85	71.15
次高温区	945.02	12.71	889.93	11.97
高温区	317.70	4.27	202.18	2.72

## 2.2 秋冬季节城市地表参数间的相关性

城市植被具有显著的增湿降温作用, 是调节城市热环境的关键生物要素。国内外学者主要根据 NDVI、植被覆盖度与地表温度间的相关性, 分析

植被对城市热环境的调控功能<sup>[12, 26-27]</sup>。总体而言, NDVI、植被覆盖度与地表温度间负相关, 即当区域植被覆盖度升高时, 地表温度下降。本研究结果也证实, 研究区域植被覆盖度与地表温度间呈显著负相关关系 (图 3 和表 3)。然而, 植被覆盖度与地表温度间相关性存在明显的季节性差异。与冬季相比, 秋季植被覆盖度与地表温度间有更强的线性拟合关系, 秋季的决定系数数值是冬季的 1.8 倍, 且秋季线性拟合关系的斜率较大, 这表明秋季植被降温功能较强。当秋季和冬季的区域植被覆盖度均提高 10 个百分点时, 地表温度可分别下降 0.742 °C 和 0.454 °C。潘竟虎和李瑶同样发现<sup>[28]</sup>, 相比冬季, 兰州中心城区秋季 NDVI 与地表温度具有较高的线性拟合关系。

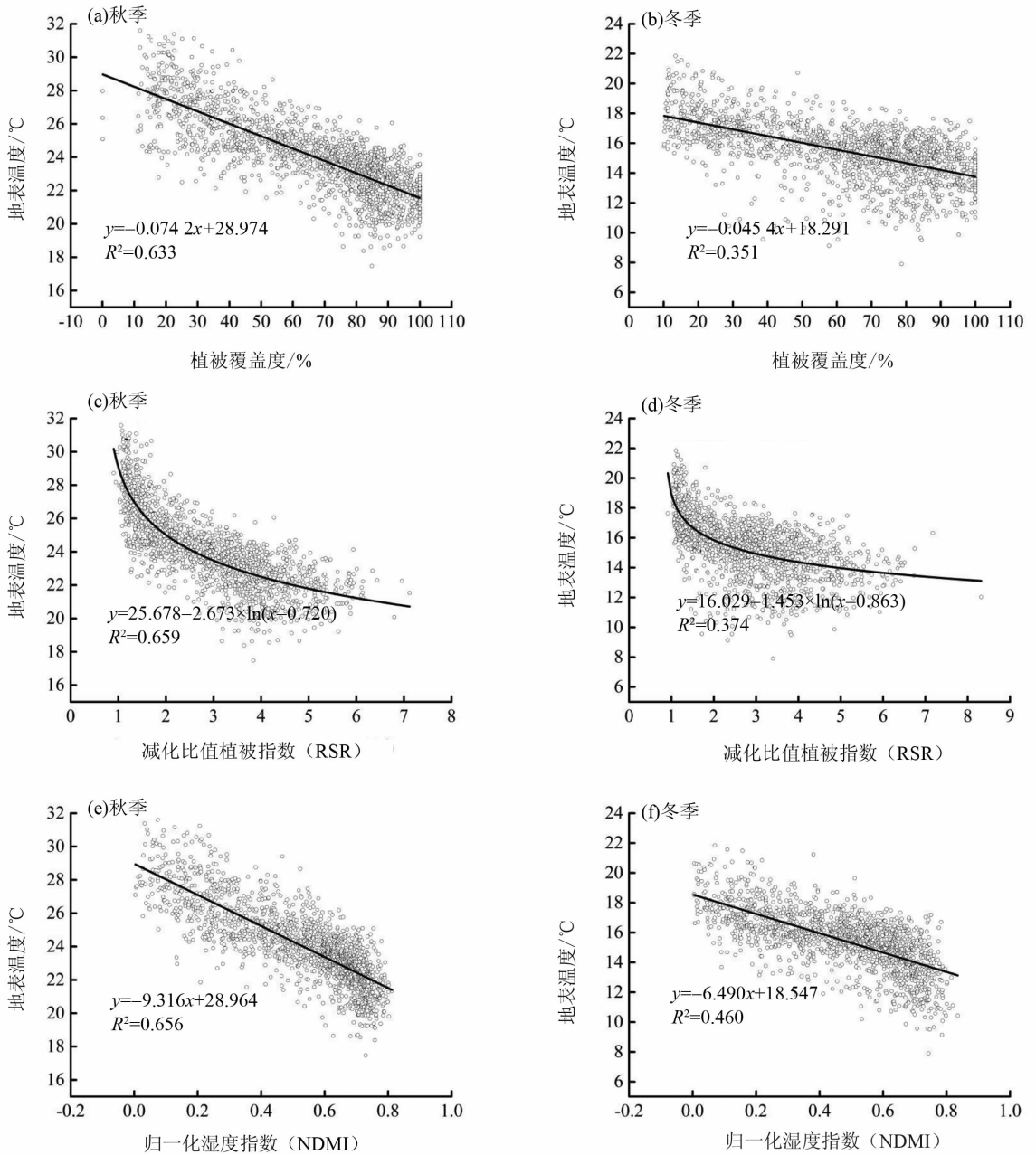


图 3 秋冬季节地表参数与地表温度的拟合关系

Fig. 3 Fitting relationships between retrieved land surface parameters and temperature in both autumn and winter

RSR 是综合了植被结构和湿度信息的综合性植被指数，其与植被覆盖度间显著正相关，秋冬季节 RSR 与植被覆盖度间的相关系数均超过 0.9 (表 3)。然而，RSR 与地表温度之间并非简单的线性关系，而是呈显著的非线性负相关关系，且当 RSR 增长到一定程度时，地表温度随 RSR 增加而降低的幅度趋于 0，即出现植被降温效应的“饱和现象”，该研究结果与王伟等人在南京的研究结果基本一致<sup>[13]</sup>。这说明当在城市建成区植被稀疏区域提高植被覆盖度可有效降低地表温度，但在公园

绿地等植被茂密区域继续提高植被覆盖度可能对地表温度的调控效果相对较差<sup>[29]</sup>。从秋季和冬季的对数函数拟合关系看 (图 3)，秋季同样具有较好的回归拟合关系，其决定系数是冬季的 1.76 倍，且秋季植被降温效应“饱和点”的 RSR 值较大。

NDMI 与植被覆盖度、RSR 具有显著的相关关系，且 NDMI 与地表温度间具有更强的相关性和线性拟合关系 (图 3 和表 3)。相关分析同样发现在各类地表参数中，NDMI 对地表温度的解释程度高且最稳健<sup>[30]</sup>，这主要是由于 NDMI 同时受到植被

蒸腾和蒸散作用、以及水体和土壤水分蒸发作用的综合影响。比如, 基于 SEBAL 模型的研究表明, 武汉市地表温度和蒸散之间存在负相关的线性关系, 说明绿地和水体的蒸散作用对城市热岛有较好

的调节作用<sup>[31]</sup>。值得注意的是, NDMI 对地表温度的影响存在季节性差异。相比冬季, 秋季 NDMI 与地表温度间的相关系数、线性拟合的决定系数和斜率均较大。

表 3 秋冬季节地表温度、植被覆盖度、NDMI 和 RSR 之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients among land surface temperature, vegetation cover, NDMI and RSR in autumn and winter

秋季					冬季				
地表参数	LST/°C	$f_v$ /%	NDMI	RSR	地表参数	LST/°C	$f_v$ /%	NDMI	RSR
LST/°C	1				LST/°C	1			
$f_v$ /%	-0.721**	1			$f_v$ /%	-0.672**	1		
NDMI	-0.931**	0.726**	1		NDMI	-0.848**	0.742**	1	
RSR	-0.781**	0.967**	0.782**	1	RSR	-0.716**	0.971**	0.788**	1

1) \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$

### 2.3 秋冬季节城市绿地对周围地表温度的影响

绿地作为城市植被分布的集中区域, 常作为城市“冷岛”, 其在热环境调控中的作用明显<sup>[32-33]</sup>。利用 GIS 的缓冲区分析发现, 城市绿地不论大小均对周围环境地表温度有显著的影响, 地表温度与缓冲区距离间呈良好的指数函数关系, 拟合的指数函数决定系数均大于 0.9 (图 4 和表 4)。但是, 研究区域秋冬季节城市绿地对周围地表温度的影响范围相对有限。总体上, 当城市绿地缓冲区距离超过 300 m 时, 相应缓冲区内的地表温度趋于恒定, 即绿地对 300 m 以外周边区域的热环境调控作用有限。该研究结果与其它研究结果基本一致。比如,

Jaganmohan 等<sup>[34]</sup>研究发现, 德国莱比锡市城市公园最大降温效应的影响距离可达到 391 m; Hamada 和 Ohta<sup>[35]</sup>研究表明, 日本名古屋城市绿地降温效应的夜间影响距离为 200 ~ 300 m, 而夏季白天可超过 300 m, 但影响距离不超过 500 m。但值得注意的是, 秋冬季节城市绿地对周围热环境的调控功能存在明显差异。其中, 秋季绿地内外地表温度差为 1.49 ~ 3.16 °C; 冬季绿地内外地表温度差为 0.61 ~ 1.59 °C。由于秋季绿地周围地表温度更高, 绿地的降温效应越强<sup>[14]</sup>, 因此秋季城市绿地内外地表温度差大于冬季。

表 4 秋冬季节不同大小的城市绿地对周围地表温度影响的指数函数拟合关系<sup>1)</sup>

Table 4 Exponential function relationships between land surface temperature and distance of buffer zones for various-size green spaces in both autumn and winter

绿地面积/km <sup>2</sup>	秋季		冬季	
	拟合关系	决定系数( $R^2$ )	拟合关系	决定系数( $R^2$ )
0.05 ~ 0.1	$y = 26.883 - 2.965 \times (0.996)^x$	0.994	$y = 17.545 - 1.761 \times (0.996)^x$	0.989
0.1 ~ 0.2	$y = 26.322 - 2.136 \times (0.992)^x$	0.976	$y = 17.532 - 1.378 \times (0.993)^x$	0.967
0.2 ~ 0.3	$y = 26.756 - 2.216 \times (0.992)^x$	0.995	$y = 18.003 - 1.412 \times (0.993)^x$	0.987
0.3 ~ 0.4	$y = 26.338 - 2.221 \times (0.991)^x$	0.984	$y = 17.129 - 1.093 \times (0.990)^x$	0.978
0.4 ~ 0.5	$y = 26.581 - 2.152 \times (0.992)^x$	0.995	$y = 17.332 - 1.299 \times (0.993)^x$	0.955
0.5 ~ 0.7	$y = 26.141 - 1.507 \times (0.992)^x$	0.999	$y = 17.223 - 0.628 \times (0.991)^x$	0.983
0.7 ~ 1.0	$y = 26.438 - 2.466 \times (0.990)^x$	0.999	$y = 17.142 - 1.293 \times (0.990)^x$	0.998
1.0 ~ 1.2	$y = 25.769 - 2.552 \times (0.992)^x$	0.996	$y = 17.484 - 1.412 \times (0.994)^x$	0.998
1.2 ~ 1.6	$y = 25.667 - 1.658 \times (0.992)^x$	0.978	$y = 16.358 - 0.566 \times (0.988)^x$	0.980
1.6 ~ 2.0	$y = 26.565 - 2.067 \times (0.992)^x$	0.998	$y = 17.419 - 1.072 \times (0.994)^x$	0.999
2.0 ~ 3.0	$y = 26.083 - 1.857 \times (0.990)^x$	0.994	$y = 17.253 - 1.032 \times (0.989)^x$	0.998
3.0 ~ 4.0	$y = 26.407 - 2.191 \times (0.988)^x$	0.997	$y = 17.843 - 1.336 \times (0.989)^x$	0.996
4.0 ~ 5.0	$y = 25.119 - 1.969 \times (0.993)^x$	0.990	$y = 16.426 - 0.976 \times (0.992)^x$	0.992
5.0 ~ 7.0	$y = 25.789 - 2.149 \times (0.990)^x$	0.994	$y = 16.785 - 1.093 \times (0.991)^x$	0.995
7.0 ~ 9.0	$y = 26.223 - 2.373 \times (0.990)^x$	0.995	$y = 16.947 - 1.359 \times (0.990)^x$	0.996
10.0 ~ 12.0	$y = 25.857 - 2.531 \times (0.994)^x$	0.941	$y = 16.475 - 1.213 \times (0.994)^x$	0.935
23.0 ~ 28.0	$y = 26.185 - 2.959 \times (0.991)^x$	0.974	$y = 16.531 - 1.536 \times (0.991)^x$	0.978

1)  $y$  为地表温度,  $x$  为距离

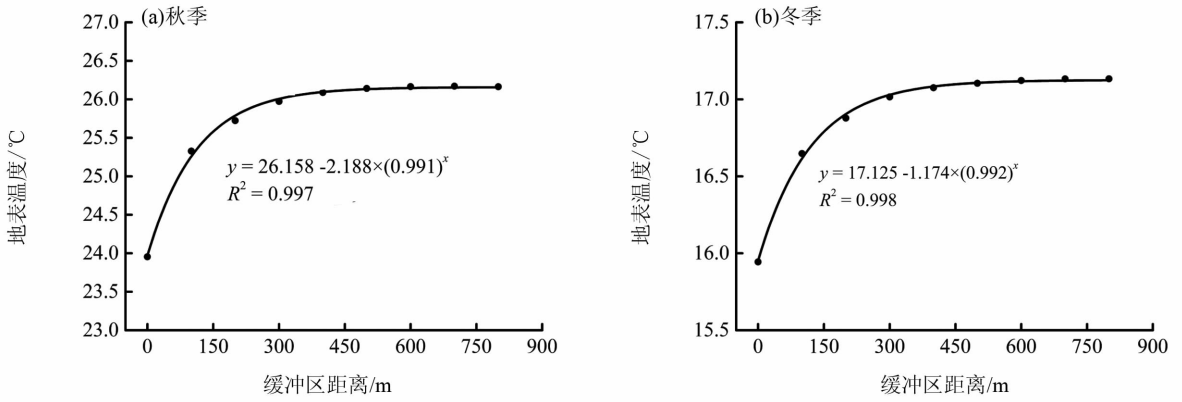


图 4 秋冬季节所有城市绿地对周围地表温度指数函数拟合关系

Fig. 4 Exponential function relationships between land surface temperature and distance of buffer zones for all green spaces in both autumn and winter

### 2.4 秋冬季节绿地属性参数与地表温度间的相关性

近年来，研究者重点关注了城市公园面积、周长和土地利用格局对热环境调控功能的重要影响。比如，Xu 等<sup>[1]</sup>发现，公园地表温度与其面积负相关，公园内水面面积比例和林地聚集度是影响其地表温度的关键；Peng 等<sup>[16]</sup>研究结果表明，当林地、耕地、城市绿地和水体等生态用地面积比例超过 70% 时，降温效果最明显；袁振等<sup>[36]</sup>发现，城市绿地面积和周长与地表温度显著负相关。大量实测研究也证实，城市绿地面积和周长对其降温效应具有关键影响<sup>[14]</sup>。本研究亦发现，秋冬季城市绿地面积和周长与其地表温度间均负相关，但绿地面积和周长变化对周围温度的调控功能存在季节性差异（表 5 和表 6）。其中，秋季绿地面积与内外累积温差间显著正相关，但绿地周长与内外累积温差相关性不显著；冬季绿地面积和周长与内外累积温差间

相关性均不显著。该结果表明：在气温较高的秋季，大面积城市绿地利于发挥绿地“冷岛”效应。同时，与冬季相比，秋季城市绿地面积和周长与绿地内部地表温度间的相关系数较小，这可能是由于秋季绿地内外温差较大，绿地对周围环境温度的降温效应更加明显，导致内部环境温度的变异性增强。另外，本研究注意到城市绿地内的植被覆盖度、NDMI 和 RSR 与内部地表温度间显著负相关，且秋季相关系数大于冬季；秋冬季节绿地内的植被覆盖度、NDMI 和 RSR 与内外累积温差间相关性不显著。然而，该研究结果并不说明提高绿地内部植被覆盖度和湿度对提高绿地的降温效应没有效果。从相关性来看，植被覆盖度、RSR 与绿地周长和面积显著正相关，特别是秋季绿地内部地表温度、NDMI 与内外累积温差间显著相关，表明提高绿地植被覆盖度和湿度可降低内部地表温度，从而间接影响周围地表温度。

表 5 秋季绿地内部属性参数之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation coefficients between land surface temperature and attributes for various-size green spaces in autumn

绿地内部地表参数	LST/°C	内外累积温差/°C	周长/m	面积/m <sup>2</sup>	f <sub>v</sub> /%	NDMI	RSR
LST/°C	1						
内外累积温差/°C	-0.553 *	1					
周长/m	-0.641 **	0.454	1				
面积/m <sup>2</sup>	-0.589 *	0.571 *	0.961 **	1			
f <sub>v</sub> /%	-0.648 **	0.206	0.689 **	0.644 **	1		
NDMI	-0.938 **	0.562 *	0.481	0.461	0.635 **	1	
RSR	-0.699 **	0.265	0.787 **	0.741 **	0.978 **	0.651 **	1

1) \*\* P < 0.01; \* P < 0.05

表 6 冬季绿地内部属性参数之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 6 Correlation coefficients between land surface temperature and attributes for various-size green spaces in winter

绿地内部地表参数	LST/°C	内外累积温差/°C	周长/m	面积/m <sup>2</sup>	$f_v$ /%	NDMI	RSR
LST/°C	1						
内外累积温差/°C	-0.246	1					
周长/m	-0.767**	0.226	1				
面积/m <sup>2</sup>	-0.745**	0.328	0.961**	1			
$f_v$ /%	-0.557*	0.000	0.612**	0.581*	1		
NDMI	-0.799**	0.368	0.439	0.456	0.652**	1	
RSR	-0.690**	-0.013	0.694**	0.647**	0.976**	0.709**	1

1) \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$

### 3 结 论

本研究以 Landsat 8 多光谱和热红外波段遥感影像为基础, 基于遥感和 GIS 技术分析广州城市热岛效应的秋冬季节季节性差异, 定量研究秋冬季节地表参数如植被覆盖度、RSR 和 NDMI 变化对地表温度的影响, 探讨秋冬季节城市绿地对热环境调控功能的影响。研究发现: ① 由于城郊下垫面性质差异以及秋冬季节人为热排放情况的不同, 广州市秋季的城市热岛强度和分布范围均大于冬季。② 秋冬季节植被覆盖度、RSR 和 NDMI 均与地表温度间显著负相关。但是相比冬季, 研究区秋季绿地植被仍处于生命活动旺盛期, 绿地植被的光合作用、蒸腾和蒸散作用较强, 导致秋季植被的降温效应更明显, 地表参数间相关性更好。值得注意的是, RSR 与地表温度呈对数函数关系, 即在城市高植被覆盖区降温效应可能出现“饱和现象”。③ 绿地具有良好热环境调节功能, 绿地周长和面积与其自身地表温度间显著负相关, 秋冬季节降温效应的影响距离为 300 m 左右。绿地周长和面积对热环境的影响存在明显的季节性差异, 其中, 冬季绿地周长和面积与地表温度间相关性更好, 但仅秋季绿地面积与内外累积温差间显著正相关。绿地地表参数与地表温

度间显著负相关, 但除秋季绿地 NDMI 与内外累积温差间显著相关外, 其它地表参数与秋冬季节内外累积温度差之间的显著性并不明显, 这一定程度说明绿地地表参数可能并不直接影响外部热环境, 而是通过影响绿地内部环境温度而间接影响周围热环境, 比如当绿地内外地表温度差增大时, 将增强绿地内外热力交换作用, 进而降低周围地表温度。总体而言, 在气温较高的季节, 城市绿地在发挥降温效应、改善城市热环境方面作用显著。

然而, 本研究尚存在以下不足: ① 采用的遥感影像时间分辨率低, 研究城市绿地降温效应所选择的遥感影像仅代表某一时相内的地表温度特征。因此, 选用单一时相的遥感影像反演不同季节地表温度特征, 具有片面性, 可能对研究结果有一定的干扰。② 研究城市绿地内部的空间异质性对其热环境调控功能影响时, 仅选用了植被覆盖度、NDMI 和 RSR 等地表参数, 忽略了绿地植物群落特征比如植物物种组成、乔灌木的比例和植物物种多样性等因素的影响。③ 选用的 NDMI 和 RSR 等地表参数在现实绿地规划中难以量化, 仅能说明提高环境湿度和植被覆盖利于发挥绿地“冷岛”效应, 难以指导绿地的规划建设实践。

### 参考文献:

- [1] XU X L, CAI H, QIAO Z, et al. Impacts of park landscape structure on thermal environment using Quick Bird and Landsat images[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(5): 818-826.
- [2] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 等. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2621-2628.  
WANG Y B, ZHAO Y H, HAN L, et al. Coupling relationship of landscape pattern and urban heat island effect in Xi'an, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2621-2628.
- [3] 刘勇洪, 房小怡, 张硕, 等. 京津冀城市群热岛定量评估[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5818-5835.  
LIU Y H, FANG X Y, ZHANG S, et al. Research on quantitative evaluations of heat islands for the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5818-5835.
- [4] 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 人为热排放对城市热环境

- 的影响研究展望[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 3991-3997.
- SUN R H, WANG Y N, CHEN T T. Impacts of anthropogenic heat emissions on urban thermal environment: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3991-3997.
- [5] 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]. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(7): 847-859.
- [6] DEWAN A, CORNER R. Impact of land use and land cover changes on urban land surface temperature[M]. Springer Netherlands, 2014.
- [7] 刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 热浪灾害对人体健康的影响及其方法研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 151-156.
- LIU J J, ZHENG Y F, WU R J. Impacts of heat waves disaster on human health and its research method[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(1): 151-156.
- [8] XIAO J, MOODY A. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98: 237-250.
- [9] 秦仲, 李湛东, 成仿云, 等. 北京园林绿地5种植物群落夏季降温增湿作用[J]. 林业科学, 2016, 52(1): 37-47.
- QIN Z, LI Z D, CHENG F Y, et al. Cooling and humidifying effects of five landscape plant communities on summer days in Beijing[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(1): 37-47.
- [10] FORMAN R. Urban ecology: Science of cities[M]. England: Cambridge University Press, 2009.
- [11] 裔传祥, 胡继超, 李小军. 土地覆盖类型对城市热岛效应的响应分析[J]. 测绘通报, 2018, (1): 72-76.
- YI C X, HU J C, LI X J. Response analysis of land cover types on urban heat island effect[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018, (1): 72-76.
- [12] YANG C, HE X, WANG R, et al. The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations[J]. *Forests*, 2017, 8(5): 153.
- [13] 王伟, 申双和, 赵小艳, 等. 两种植被指数与地表温度定量关系的比较研究——以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(4): 439-444.
- WANG W, SHEN S H, ZHAO X Y, et al. Comparative analysis on quantitative relationships between NDVI, RSR and land surface temperature—a case study of Nanjing[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(4): 439-444.
- [14] 刘凤凤, 闫伟姣, 孔繁花, 等. 基于气温实地调查的城市绿地降温效应研究现状与未来展望[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1387-1396.
- LIU F F, YAN W J, KONG F H, et al. A review on the urban green space cooling effect based on field measurement[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1387-1396.
- [15] 岳文泽, 刘学. 基于城市控制性详细规划的热岛效应评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3631-3640.
- YUE W Z, LIU X. Assessment on heat island effect based on urban regulatory planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1387-1396.
- [16] PENG J, XIE P, LIU Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [17] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模-景观组分到空间构型[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7769-7780.
- 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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [18] 张宇, 陈龙乾, 王雨辰, 等. 基于TM影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 629-640.
- ZHANG Y, CHEN L Q, WANG Y C, et al. Mechanism research of urban land surface wetness regulating urban heat island effect based on TM images[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 629-640.
- [19] 王刚, 管东生. 植被覆盖度和归一化湿度指数对热力景观格局的影响——以广州为例[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2429-2436.
- WANG G, GUAN D S. Effects of vegetation cover and normalized difference moisture index on thermal landscape pattern: a case study of Guangzhou, South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2429-2436.
- [20] 陈云. 基于Landsat 8的城市热岛效应研究初探——以厦门市为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2): 123-128.
- CHEN Y. A preliminary study on the urban heat island effect based on Landsat 8; case of Xiamen city[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(2): 123-128.
- [21] 陈旭, 李霖, 王江. 城市绿地对热岛效应的缓解作用研究——以台州市为例[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 643-649.

- CHEN X, LI L, WANG J. Heat island effect mitigation by urban green space system; a case study of Taizhou City[J]. *Ecology and Environment*, 2015, 24(4): 643 - 649.
- [22] 张艳, 鲍文杰, 余琦, 等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1121 - 1128.
- ZHANG Y, BAO W J, YU Q, et al. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1121 - 1128.
- [23] 刘帅, 李琦, 朱亚杰. 基于 HJ - 1B 的城市热岛季节变化研究——以北京市为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 84 - 88.
- LIU S, LI Q, ZHU Y J. Study on seasonal variation of urban heat island with HJ - 1B satellite imagery: a case study of Beijing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 84 - 88.
- [24] 史超, 王学平, 程诚. 基于定量遥感的武汉城市热岛强度时空格局演变分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(12): 113 - 117.
- SHI C, WANG X P, CHEN C. Analysis on spatial and temporal variation of the urban heat island intensity based on quantitative remote sensing in Wuhan city[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(12): 113 - 117.
- [25] 杨沈斌, 赵小艳, 申双和, 等. 基于 Landsat TM/ETM + 数据的北京城市热岛季节特征研究[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(4): 427 - 435.
- YANG S B, ZHAO X Y, SHEN S H, et al. Characteristics of urban heat island seasonal pattern in Beijing based on Landsat TM/ETM + imagery[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(4): 427 - 435.
- [26] SINGH R B, GROVER A. Spatial correlations of changing land use, surface temperature (UHI) and NDVI in Delhi using Landsat satellite images[M]. Springer Japan, 2015.
- [27] 唐泽, 郑海峰, 任志彬, 等. 城市地表热力景观格局时空演变——以长春市为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3264 - 3273.
- TANG Z, ZHENG H F, REN Z B, et al. Spatial and temporal changes to urban surface thermal landscape patterns: a case study of Changchun City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3264 - 3273.
- [28] 潘竟虎, 李瑶. 兰州中心城区热环境季节动态遥感分析[J]. *安全与环境学报*, 2014, 24(6): 280 - 286.
- PAN J H, LI Y. Remote sensing analysis of the seasonal dynamics of Lanzhou's urban thermal environment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 24(6): 280 - 286.
- [29] 李瑶, 潘竟虎. 基于 Landsat 8 劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析——以兰州市中心城区为例[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(1): 111 - 119.
- LI Y, PAN J H. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: a case of Lanzhou City[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(1): 111 - 119.
- [30] 樊辉. 基于 Landsat TM 的城市热岛效应与地表特征参数稳健关系模型[J]. *国土资源遥感*, 2008, 20(3): 45 - 51.
- FAN H. The robust linear regression model between satellite - derived urban heat island and underlying surface parameters[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 28(3): 45 - 51.
- [31] 李鸥. 基于遥感与 CFD 仿真的城市热环境研究——以武汉市夏季为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- LI K. City heat environment research based on remote sensing and CFD simulation——a case study of Wuhan city in summer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [32] OLIVEIRA S, ANDRADE H, VAZ T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat; A case study in Lisbon[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2186 - 2194.
- [33] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 123(2): 87 - 95.
- [34] JAGANMOHAN M, KNAPP S, BUCHMANN C M, et al. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 134 - 145.
- [35] HAMADA S, OHTA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1): 15 - 24.
- [36] 袁振, 吴相利, 臧淑英, 等. 基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(10): 1600 - 1608.
- YUAN Z, WU X L, ZANG S Y, et al. Cooling effect of green patches based on TM image in Harbin downtown city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(10): 1600 - 1608.