

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.005

城市地表热环境季节变化及与下垫面特征关系

吴昌广, 林姚宇, 王耀武, 龚咏喜, 崔红蕾, 夏丽丽

(深圳市城市规划与决策仿真重点实验室(哈尔滨工业大学深圳研究生院), 518055 广东 深圳)

摘要:为进一步揭示城市地表热环境的时空分异机制,利用遥感信息技术提取深圳市西部地区不同季节的地表温度、植被覆盖、不透水面、水分状况等下垫面特征参数,在此基础上分析地表热环境的季节变化特征及与下垫面生物物理参数的定量关系.结果表明:研究区地表热力景观的空间分布、强度随季节发生显著变化;不透水面指数、湿度指数与地表温度分别呈指数正相关、线性负相关且在不同季节表现稳定,而植被指数与地表温度呈非线性关系并随季节变化;多元线性逐步回归分析表明,不透水面对地表温度的调节作用最大、地表湿度次之、植被覆盖最小.

关键词:地表温度;生物物理参数;季节变化;遥感;深圳西部地区

中图分类号: X87;X32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0026-05

Seasonal variations of urban land surface thermal environment and its relationship to land surface characteristics

WU Changguang, LIN Yaoyu, WANG Yaowu, GONG Yongxi, CUI Honglei, XIA Lili

(Shenzhen Key Laboratory of Urban Planning and Decision Making(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School), 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: In order to reveal the mechanisms of spatial and temporal heterogeneity of urban surface thermal environment, the land surface characteristic parameters in different seasons in western Shenzhen including land surface temperature (LST), normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference impervious surface index (NDISI), and normalized difference moisture index (NDMI) were obtained using remote sensing technology. The seasonal variations of land surface thermal environment and its quantitative relationship to biophysical parameters were also analyzed. The results showed that significant seasonal variations were observed for the spatial pattern and intensity of thermal environment landscape in the study area. The positive exponential correlation was observed between NDISI and LST, while negative linear correlation between NDMI and LST. These two relations were stable with the seasonal variations. In contrast, the non-linear correlation was observed between NDVI and LST, which varies with the seasonal variations. The multiple linear stepwise regression analysis indicated that the regulating effect on LST decreased in the order: impervious surface area>surface wetness>vegetation cover.

Keywords: land surface temperature; biophysical parameters; seasonal variations; remote sensing; western Shenzhen

地表温度作为地气系统能量平衡的基本物理量,已成为城市热环境研究的常用指标.与大气温度相比,地表温度在城市尺度上具有更高的时空分异性,且受下垫面覆被和人为活动的影响更为强烈^[1].因此,阐明城市地表热环境的时空分异机制,可为城市规划与建设部门应对城市热岛效应提供决策依据.多数研究表明,地表温度与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)存在显著负相关^[2],但也有研究证实 NDVI 与地表温度的负相关性较弱^[3],尤其在植被稀疏区域呈分段线性关系并随季节变化^[4].此后,部分学者将不透水面指数(imper-

收稿日期: 2014-05-12.
基金项目: 国家自然科学基金(51308143);中国博士后科学基金(2012M520718);深圳市科技研发基础项目(JCYJ20130325151523015, JCYJ20120615145601342).
作者简介: 吴昌广(1984—),男,博士后;
王耀武(1968—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 王耀武,wyw@hitsz.edu.cn.

不透水面指数(imper-

surface area, ISA) 作为 NDVI 的补充来分析地表温度时空分异机制, 研究表明在不同区域及时间尺度上 ISA 对地表温度均有显著正向影响^[5]. 地表水分含量的空间差异也会引起城市地表热环境变异, 相关研究揭示地表温度与归一化湿度指数 (normalized difference moisture index, NDMI) 存在显著负相关^[6].

从上述研究看, 城市地表温度异质性是多因素共同作用的结果, 如果仅采用单一因素来解释其分异特征可能会存在一定不确定性. 但目前针对地表温度分异的多因素综合分析还相对缺乏, 且大多研究基于单一时相或跨年遥感数据极少关注地表温度年内季节动态. 本文以深圳西部地区为研究对象, 利用 2004 年 4 景 Landsat5 TM 数据反演不同季节的地表温度、植被覆盖、不透水面、水分状况等下垫面特征参数, 在此基础上探讨研究区地表热环境的季节变化特征, 并从单因素和多因素两个角度定量分析地表温度与下垫面生物物理参数的关系, 以期更好地解释城市地表热环境的时空分异机理.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次选取深圳西部地区为研究区域, 包括罗湖区、福田区、南山区、宝安区以及龙岗区的一部分, 面积 1 145 km² 约占全市总面积 1/2.

1.2 数据来源及预处理

本次使用的 4 景 Landsat5 TM 影像, 轨道号为 122/44, 成像时间为 2004 年的 1 月 21 日、3 月 9 日、6 月 13 日、10 月 19 日, 分别代表冬季、春季、夏季、秋季. 影像数据是由美国地质调查局数据共享网站 (<http://glovis.usgs.gov>) 提供的 Level 1T 产品, 在进行下垫面特征参数提取之前, 利用 ENVI4.7 软件中 FLAASH 大气校正模块对上述影像进行大气校正, 降低大气中水汽、臭氧、气溶胶粒子等因素对各波段反射率的影响, 以提高遥感信息定量提取的精度.

1.3 地表温度反演

采用覃志豪等^[7]针对 Landsat5 TM 提出的单窗算法反演地表温度, 其计算式为

$$LST = \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] \times T_6 - D T_a\} / C,$$

式中: LST 为地表实际温度, K; a 和 b 是常量, 当温度介于 0~70 °C 时, a 取值 -67.355 351, b 取值 0.458 606; T_6 为遥感器观测到的亮度温度, K; 计算式 $T_6 = 1\ 260.56 / \ln[1 + 60.776 / (0.123\ 8 + 0.005\ 632\ 56DN_{TM6})]$, DN_{TM6} 为 TM 数据 6 波段的

像元灰度值; T_a 为大气平均作用温度, K; C 和 D 为中间变量, $C = \varepsilon\tau$, $D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau]$, ε , τ 分别为热红外波段的地表比辐射率和大气透过率; T_a 、 ε 、 τ 计算过程见文献[8 - 9]. 最后利用深圳市气象台历史数据, 基于 Erdas 软件空间建模工具完成上述计算, 并将反演得到的地表温度减去 273.15 K 转为摄氏温度.

1.4 下垫面生物物理特征参数获取

1.4.1 植被覆盖信息提取

采用归一化植被指数 NDVI 提取地表植被覆盖信息, 该指数可有效反映植被的绿量、密度及健康状况, 其计算式为

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}},$$

式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 分别为 TM 影像近红外波段、红光波段的地表反射率.

1.4.2 不透水面信息提取

采用归一化不透水面指数 (normalized difference impervious surface index, NDISI) 提取地表不透水面^[10], 其计算式为

$$NDISI = \frac{\rho_{TIR} - [(MNDWI + \rho_{NIR} + \rho_{MIR1})/3]}{\rho_{TIR} + [(MNDWI + \rho_{NIR} + \rho_{MIR1})/3]},$$

式中: ρ_{MIR1} 、 ρ_{TIR} 分别为 TM 影像中红外波段、热红外波段的地表反射率, MNDWI 为修正归一化水体指数 (modification normalized difference water index)^[11], 计算式为

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR1}},$$

式中 ρ_{Green} 、 ρ_{MIR1} 分别为 TM 影像绿光波段、中红外波段的地表反射率.

1.4.3 地表水分信息提取

采用归一化湿度指数 NDMI 提取地表水分状况^[12], 该指数可有效反映水体、土壤及植物中的水分特征^[6], 计算式为

$$NDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR1}}.$$

2 结果与分析

2.1 地表热环境的季节变化特征

2.1.1 地表热力景观的空间分异特征

为了直观展示深圳西部地区不同季节地表热环境的空间分布格局, 采用密度分割法将地表温度分为低温区 ($t \leq T - T_{SD}$)、常温区 ($T - T_{SD} < t < T + T_{SD}$)、高温区 ($T + T_{SD} \leq t$) 3 种热力景观, 其中 T 、 T_{SD} 分别为研究区地表温度的平均值和标准差. 冬季高温热力景观主要分布在罗湖、福田、

南山及龙岗地区,且部分水体(如西丽水库、铁岗水库、深圳水库)处于高温区,这可能与水体热容量有关. 相关研究表明,水体在冬季降温过程,降温幅度要小于其他地类具有一定保温作用^[13]. 春、夏、秋三季的高温热力景观主要分布在宝安区西北部,且所有水体均处于低温区. 由热力景观规模来看(表 1),地表温度热岛效应冬季最强,高温区占 28.73%,春季最弱,高温区占 11.44%. 上述表明,在地表温度热岛研究中,季节差异是个不可忽视的因素,地表热力景观的空间分布、强度规模均随季节变化产生明显分异.

表 1 不同热力景观占研究区总面积的比例 %

时间	低温区	常温区	高温区
冬季 2004-01-21	13.30	57.97	28.73
春季 2004-03-09	15.79	72.77	11.44
夏季 2004-06-13	15.48	67.81	16.71
秋季 2004-10-19	16.52	66.29	17.19

2.1.2 土地覆被类型的地表温度变化

为进一步揭示地表温度的时空分异特征,结

表 2 不同季节土地覆被类型的地表温度

时间	土地覆被	最低温度	最高温度	平均温度	温差
冬季 2004-01-21	绿地	3.25	22.48	12.59	19.23
	水体	5.46	20.78	13.18	15.32
	建设用地	2.92	26.85	14.11	23.93
春季 2004-03-09	绿地	11.04	33.82	22.61	22.78
	水体	12.93	35.50	17.77	22.57
	建设用地	12.03	40.69	25.03	28.66
夏季 2004-06-13	绿地	20.01	40.25	29.07	20.24
	水体	20.60	43.53	24.57	22.93
	建设用地	20.53	47.63	33.15	27.10
秋季 2004-10-19	绿地	16.30	35.42	25.43	19.12
	水体	20.13	38.04	22.85	17.91
	建设用地	18.41	42.11	28.72	23.70

2.2.1 单因素回归分析

从散点图 1 和表 3 回归拟合方程可看出, NDVI 与地表温度间存在非线性关系,NDVI 值在小于 0 的区域与地表温度呈正相关,而在大于 0 的区域呈负相关. 这是因为水体 NDVI 值要小于 0,因此在分析区域植被覆盖与地表温度的关系

合深圳西部地区 2004 年土地覆被类型数据,对绿地、水体、建设用地的地表温度进行统计(表 2). 在冬季,绿地、水体、建设用地三者间的地表平均温度差异较小不到 1.5℃,其中水体平均温度比绿地高 0.6℃;而在春、夏、秋三季,不同土地覆被类型间的地表平均温度差异较大,绿地、水体比建设用地分别低 8℃、4℃左右. 此外,同一土地覆盖类型在同一时期的地表温度存在显著差异,如建设用地的内部温差在各个季节均保持在 25℃左右. 由此可见,同一土地覆被类型中仍存在地表异质特性,仅使用离散型的土地覆盖类型数据并不能细致地描述出地表温度时空变异.

2.2 地表温度与下垫面生物物理参数的关系

通过 8×8 的像元网格间距在 LST、NDVI、NDISI、NDMI 专题图上进行取样,采样数量为 19 891 个,绘制地表温度与生物物理参数间的散点图,同时利用 SPSS 软件对其定量关系进行回归分析,获得最佳拟合方程.

时,需要将水体景观剔除以减少负值干扰. 此外,地表温度与 NDVI 的关系受季节变化影响较大,冬季 NDVI 与地表温度的拟合效果要明显弱于春、夏、秋三个季节. 由于 NDVI 与地表温度关系的不稳定性及非线性特点,表明其还不足以作为定量描述城市地表热环境的单一指标.

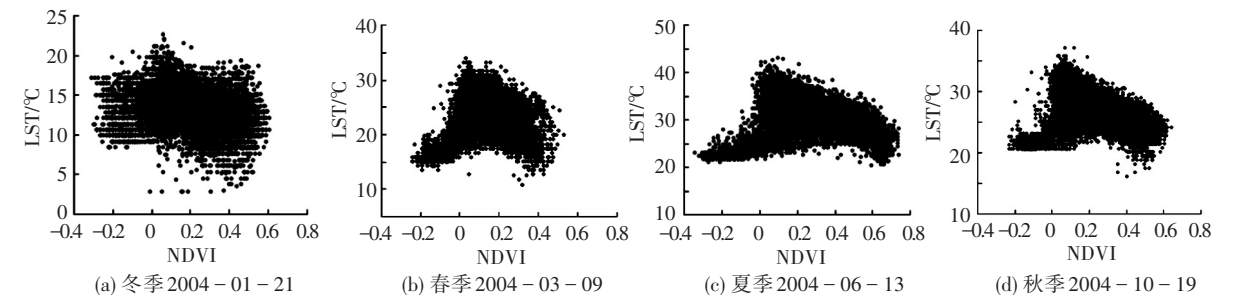


图 1 NDVI 与 LST 散点图

从散点图 2 可看出,NDISI 与地表温度之间存在显著正相关性,且在不同季节都明显存在,NDISI 高值区对应较高地表温度,NDISI 低值区对应较低

地表温度. 由表 3 可看出,NDISI 与地表温度之间并不是简单的线性关系,而呈指数函数关系 ($R^2 > 0.7$),表明随着下垫面不透水面盖度的增加,地表

温度上升加快,即高不透水面覆盖区的升温幅度要高于低不透水面覆盖区. 这与相关数值模拟研究结果一致,张弛^[14]利用城市冠层气象模型模拟不透水面与温度间的关系,发现不透水面盖度高的地区

增温幅度可达 4.61 ℃,而不透水面盖度低的地区增幅却只有 1.81 ℃. 可见,NDISI 不仅能够用来反映城市的空间范围与开发强度,还可作为度量城市地表热环境特征的重要指标因子.

表 3 LST 与 NDVI、NDISI、NDMI 的关系方程

时间	单因子回归拟合方程		
冬季	$LST = -10.07NDVI^2 - 0.083NDVI + 14.14$	$LST = 14.97e^{0.47NDISI}$	$LST = -5.34NDMI + 14.32$
2004-01-21	$R^2 = 0.12$	$R^2 = 0.72$	$R^2 = 0.16$
春季	$LST = -94.92NDVI^2 + 24.89NDVI + 23.29$	$LST = 26.24e^{0.34NDISI}$	$LST = -15.52NDMI + 25.33$
2004-03-09	$R^2 = 0.33$	$R^2 = 0.87$	$R^2 = 0.52$
夏季	$LST = -40.52NDVI^2 + 15.69NDVI + 31.60$	$LST = 33.42e^{0.31NDISI}$	$LST = -18.93NDMI + 33.48$
2004-06-13	$R^2 = 0.41$	$R^2 = 0.86$	$R^2 = 0.54$
秋季	$LST = -39.03NDVI^2 + 10.14NDVI + 27.85$	$LST = 29.16e^{0.31NDISI}$	$LST = -14.07NDMI + 29.26$
2004-10-19	$R^2 = 0.37$	$R^2 = 0.85$	$R^2 = 0.58$

注:回归方程均通过 $p < 0.01$ 的显著性检验.

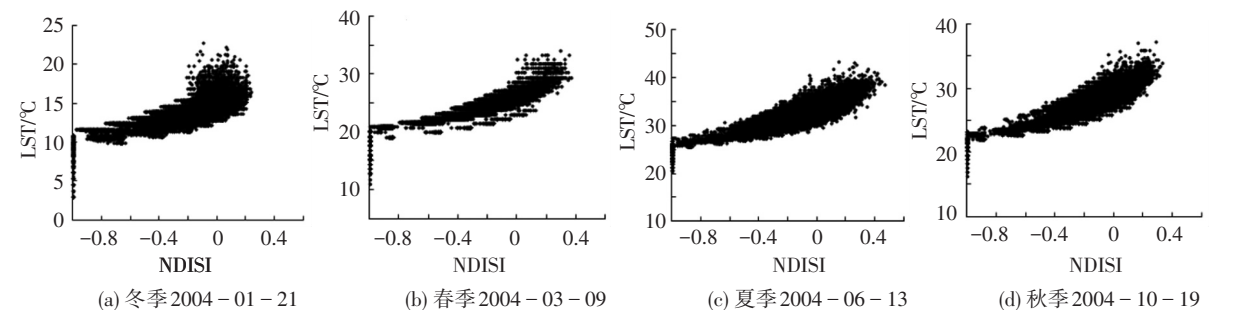


图 2 NDISI 与 LST 散点图

从散点图 3 和表 3 回归方程可看出,NDMI 在不同季节与地表温度间均呈线性负相关,其中春、夏、秋三季的线性拟合程度较好 ($R^2 > 0.5$),而在冬季拟合程度较低 ($R^2 = 0.16$),但都优于同一季节 NDVI 与地表温度间的拟合效果. 从回归方程斜率来看,NDMI 对地表温度影响较大,其每

增加 0.1 个单位可使春、夏、秋的地表温度分别下降 1.55、1.89、1.41 ℃,即使在冬季地表温度也要下降 0.54 ℃左右. Amiri 等^[3]在伊朗的研究同样表明,植被含水量变化导致高植被覆盖区从低温特征向高温特征转变,可见地表水分状况对城市地表热环境调控尤为重要.

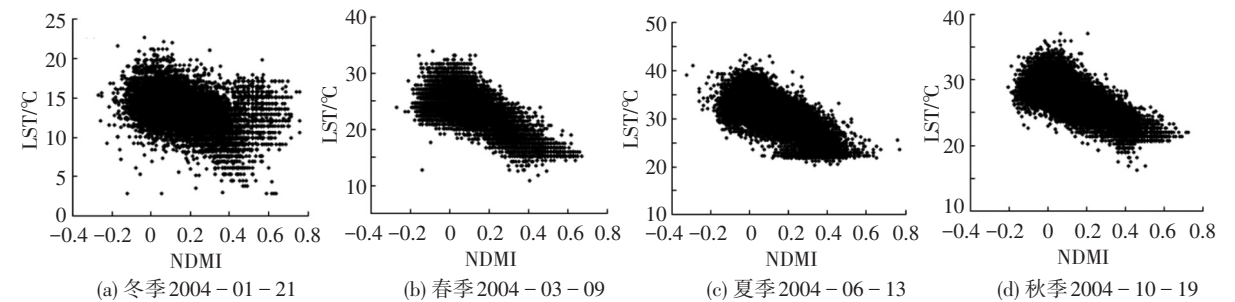


图 3 NDMI 与 LST 散点图

2.2.2 多因素综合分析

为进一步了解上述生物物理特征参数对城市地表温度的综合影响,采用逐步回归分析法将 NDVI、NDISI、NDMI 综合起来与地表温度进行多元线性回归. 从表 4 可看出,植被覆盖、不透水面、地表湿度均是影响地表温度的重要因素. 此外,各个季节的多元回归方程 R^2 均大于一元回归方程,表明综合多种指数描述地表温度异质性比利用单一指数具有更好的效果. 以 NDMI 为例,在单因子回归模型中,NDMI 每

增加 0.1 个单位,夏季地表温度下降 1.89 ℃,而在综合多因素回归模型中,NDMI 每增加 0.1 个单位,夏季地表温度仅下降了 0.55 ℃,两者间相差了 3 倍. 在多因子回归方程中,冬、夏、秋三季 NDVI 与地表温度呈负相关,而在春季则表现出正相关. 可见单因素分析很难全面反映下垫面覆被特征与地表温度间的关系,并可能夸大检验对象之间真实的相关系数. 从回归方程系数来看,NDISI 对地表温度的调控作用最大、NDMI 次之、NDVI 最小.

表 4 地表温度与多因子的综合关系方程

时间	多元线性回归最优拟合方程	
冬季 2004-01-21	$LST = 15.80 + 7.03NDISI - 3.60NDMI - 1.37NDVI$	$R^2 = 0.77$
春季 2004-03-09	$LST = 25.06 + 6.14NDISI - 4.23NDMI + 2.12NDVI$	$R^2 = 0.91$
夏季 2004-06-13	$LST = 34.05 + 7.83NDISI - 5.49NDMI - 1.17NDVI$	$R^2 = 0.88$
秋季 2004-10-19	$LST = 29.74 + 6.46NDISI - 5.00NDMI - 1.38NDVI$	$R^2 = 0.88$

注:回归方程均通过 $p < 0.01$ 的显著性检验

3 结 语

利用遥感空间信息技术分析了深圳市西部地区 2004 年地表热环境的季节变化特征,并阐明了地表温度与下垫面特征的定量关系. 主要结论如下:城市地表热力景观的空间分布、强度具有明显季节特征;与离散型的土地覆盖数据相比,描述复杂地表组分特征的生物物理参数可以更准确地表达地表温度时空分异,其中 NDISI、NDMI 与地表温度分别存在指数、线性相关并在不同季节表现稳定,而 NDVI 与地表温度存在非线性关系且随季节变化;多因子综合分析表明,综合 NDVI、NDISI、NDMI 三个因子能更加细致、全面地揭示城市地表热环境的异质特征,其中不透水面对地表温度调控作用最大、地表湿度次之、植被覆盖最小.

本次在 30 m 分辨率的像元条件下分析地表温度与下垫面因子间定量关系,但像元尺度变化会引起下垫面生物物理特征参数改变,今后应在不同像元尺度水平上进一步分析地表温度与下垫面因子的关系,并建立相应的地表热环境尺度推绎模型. 此外,本次仅选用了特定年、特定季节和特定时刻的遥感数据,在未来研究中还需增加更多的遥感资料验证上述结论. 同时,城市人为活动强度和景观格局特征等因素也会对外地表温度产生影响^[15],所以在“植被—不透水面—湿度—温度”的回归模型上增加人为活动强度、景观格局特征等因子也是未来地表温度空间分异机理研究的重点内容.

参考文献

[1] 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[J].地理科学进展,2011,30(1):35-41.

[2] RAYNOLDS M K, COMISOJ C, WALKER D A, et al. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1884-1894.

[3] AMIRI R, WENG Qihao, ALIMOHAMMADI A, et al. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2606-2617.

[4] YUAN Fei, BAUER M E. 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, 2007, 106(3): 375-386.

[5] XU Hanqiu, LIN Dongfeng, TANG Fei. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(8): 1873-1883.

[6] CHEN Xiaoling, ZHAO Hongmei, LI Pingxiang, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-146.

[7] 覃志豪, ZHANG Minghua, KARNIELI A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报, 2001, 56(4): 456-466.

[8] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J].国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41.

[9] 覃志豪, LI Wenjuan, ZHANG Minghua, 等.单窗算法的大气参数估计方法[J].国土资源遥感, 2003, 15(2): 37-43.

[10] XU Hanqiu. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface Index (NDISI) [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(5): 557-565.

[11] XU Hanqiu. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.

[12] WILSON E H, SADER S A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(3): 385-396.

[13] 刘勇洪,轩春怡,权维俊.基于卫星资料的北京陆表水体的热环境效应分析[J].湖泊科学, 2013, 25(1): 73-81.

[14] 张弛.上海市城市热岛的时间多尺度分析与数值试验[D].上海:华东师范大学, 2011.

[15] LI Xiaoma, ZHOU Weiqi, OUYANG Zhiyun, et al. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China [J]. Landscape Ecology, 2012, 27(6): 887-898. (编辑 赵丽莹)