

引用格式: Yang Yuting, Tang Jiafa, Bian Jinhu, *et al.* Seasonal Variations in the Relationship between Land Surface Temperature and Impervious Surface Percentage in Kolkata [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 79-89. [杨玉婷, 汤家法, 边金虎, 等. 加尔各答市地表温度与不透水面比例季相相关性研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 79-89.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0079

加尔各答市地表温度与不透水面比例季相相关性研究

杨玉婷^{1,2,3}, 汤家法¹, 边金虎², 李爱农², 雷光斌², 黄平³, 蒋梓淳³

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

3. 四川省农业科学院遥感与应用研究所, 四川 成都 610066)

摘要:城市化的显著特征是自然地表不断被热容量大的不透水面取代,进而造成城市热岛效应和严重的城市生态问题。孟中印缅经济走廊是古代南方丝绸之路的重要路段和“一带一路”建设的重要战略通道,加尔各答市是孟中印缅经济走廊印度境内的重要节点城市,战略地位重要,对其城市化进程及与地表温度相关性研究对孟中印缅经济走廊印度段建设具有重要的借鉴意义。传统地表温度与不透水面的相关性研究主要以年为时间尺度,较少关注城市不同季相地表温度与不透水面的相关性及其差异。以热带季风气候的季相区分为依据,基于旱季、雨季和凉季3个季相的Landsat 8影像反演了加尔各答市地表温度和与不透水面比例,定量研究两者的关系,探讨了地表温度与不透水面比例的季相相关性。结果表明:①研究区内,低温和高温空间分布相对比较集中,高温区域集中在建成区,而低温主要分布在茂密植被覆盖区和水体区域;②加尔各答市从旱季到雨季再到凉季热岛效应程度总体呈下降趋势,旱季时城市热岛效应最强,凉季时城市热岛效应最弱;③每个季相,地表温度与不透水面比例都呈正相关,地表温度随着不透水面比例增加均呈现先快速上升,后缓慢增加,最后急剧增加的趋势,其中旱季时地表温度增长最快,雨季时地表温度增长次之,凉季时地表温度增长最慢。加尔各答市热环境研究将对孟中印缅经济走廊印度段城市热环境背景及生态效应认知等方面产生积极意义。

关键词:地表温度;不透水面比例;季相差异;回归分析;加尔各答市;孟中印缅经济走廊

中图分类号:X16; TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)01-0079-11

1 引言

近年来,城市化的不断发展使得下垫面结构和类型发生显著变化,许多植被、水体等自然地表被建筑、道路等热容量大的不透水面所取代^[1]。不透水面增加必然会造成城市热环境恶化、地表温度升高,形成城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)^[2]。

UHI是城市中心区域温度显著高于周围郊区温度的一种现象,会给城市生态、区域小气候以及人类居住环境等带来一系列的负面影响^[3]。因此研究城市不透水面变化与城市热岛的相关性对城市生态系统可持续发展具有重要意义。

在城市热岛方面,早期的城市热岛研究以地面气象站点资料为监测的主要依据,但地面气象站数

收稿日期:2019-10-09;修订日期:2020-12-30

基金项目:中国科学院战略性先导专项子课题(XDA19030303),国家自然科学基金项目(41631180、41701432),国家重点研发计划专题(2016YFA0600103、2016YFC0600201-06),中国科学院成都山地所“一三五”重要方向性项目(SDS-135-1708),中国科学院青年创新促进会(2019365)联合资助。

作者简介:杨玉婷(1996-),女,四川成都人,研究实习员,主要从事城市和农业遥感研究。E-mail:569099906@qq.com

通讯作者:边金虎(1984-),男,安徽阜阳人,副研究员,主要从事山地遥感影像时空融合方法与应用研究。E-mail:bianjinhu@imde.ac.cn

量有限,无法在空间上完整反映城市地表温度特征。随着卫星遥感技术的发展,遥感数据反演所得的地表辐射温度能够大面积覆盖地表,具有较高的空间分辨率和空间连续性,遂成为城市热环境研究的主要手段^[4]。目前,基于遥感影像的城市热环境研究主要集中在3个方面:一是高分辨率城市地表温度反演方法研究^[5-7];二是基于城市地表温度反演数据的城市热环境时空变化格局分析^[8-10];三是地表温度与土地覆被类型及其变化的相关性分析^[11-13]。

不同土地覆被类型的地表温度存在显著差异,众多学者开展了大量相关研究。徐涵秋^[14]对地表温度与不透水面盖度、水体、植被之间的关系进行了研究。Zhang等^[15]研究发现地表温度与归一化植被指数NDVI呈现正相关,而与归一化建筑指数NDBI呈现负相关。Yuan等^[16]发现地表温度与不透水面的相关性比植被的相关性强。后续学者们也从不同方面研究不透水面与地表温度的相关性,如不透水面景观格局变化对地表温度的影响^[17]、不同空间尺度下不透水面与地表温度的相关性^[18]等。然而,以上研究只选用某一时刻的地表温度数据来反映以年为时间尺度的长时间序列城市热环境效应,无法深入了解城市不透水面增温的季相变异特征及其变异程度,因此研究地表温度及其与不透水面季相性相关差异是必要的。

“一带一路”是由中国倡导的国家级顶层合作倡议,旨在借鉴古代丝绸之路的历史符号,积极发展中国与沿线其他国家的经济合作关系,打造利益、命运和责任共同体^[19]。孟中印缅经济走廊是古

代南方丝绸之路的重要路段和“一带一路”建设的重要战略通道^[20],其发展建设将对“一带一路”倡议发挥重要推动作用。加尔各答市位于孟中印缅经济走廊的孟加拉湾海上通道和缅—印—孟物流通道、经济开发及生态保护带上,同时该市还是印度东部最大的港口,具有独特的地位,对其城市热环境研究将有利于推动孟中印缅经济廊道建设,如了解生态环境影响,中资企业投资创业等方面产生积极影响。综上,本文利用3个季相的Landsat 8遥感影像反演加尔各答市地表温度和不透水面比例,计算出城市热岛比例指数,对比分析不同季相加尔各答市地表温度特征,并将加尔各答市地表温度和不透水面比例进行回归分析,对比分析不同季相加尔各答市两者之间的相关性。

2 研究区与数据

2.1 研究区

加尔各答(22°33' N, 88°20' E)位于印度东部恒河三角洲,胡格利河的东岸,属低纬度地区。全市总面积185 km²,人口总数约458万,是印度西孟加拉邦首府和印度第三大城市^[21]。加尔各答地理位置特殊,地势平坦,海拔高度介于1.5~9 m。气候上,该区属于热带气候,年平均气温约26.8℃,月平均气温19~30℃,旱季炎热潮湿,在5~7月最高气温经常超过40℃,从12月到次年1月,气温会下降到12~14℃。降水在季节上分配极不均匀,受东南季风影响,6~9月的降水超过该区50%的降水量^[22]。近年来随着“一带一路”战略的实施,加尔各答作为重要节点城市之一,凭借其便利的交通、独

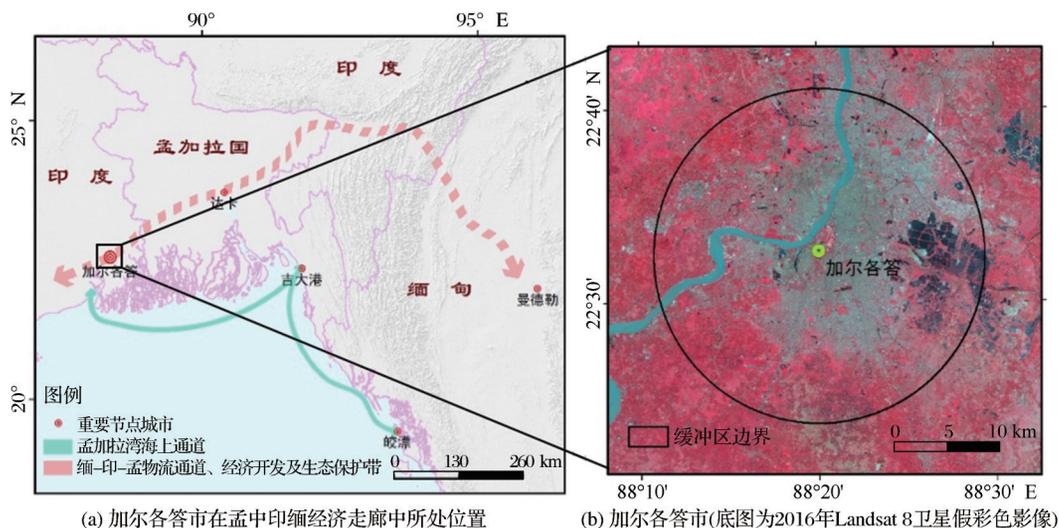


图1 研究区

Fig.1 Study area

特的地理优势得到了快速的发展。由于获取不到准确的加尔各答市行政区划边界,本研究以加尔各答市中心为圆心,建立半径为 16 km 的圆形缓冲区为研究区(图 1(b))。

2.2 数据与预处理

使用 Landsat 8 OLI/TIRS 影像作为不透水面比例反演和地表温度反演的主要数据,并采用国产高分 GF-1 卫星数据作为不透水面比例建模和验证的主要数据。由于印度气候分为旱季(3~5月)、雨季(6~10月)和凉季(11~次年2月)^[23],为研究加尔各答市各季相的地表温度与不透水面比例之间的相关性,根据印度气候分区,分别选取对应季相具

有代表性的 Landsat 8 OLI 无云遥感影像(表 1)进行处理分析,数据来源于美国地质调查局。GF-1 卫星上分别搭载全色相机和多光谱相机,其中多光谱影像空间分辨率为 8 m,全色影像空间分辨率分别为 2 m。本文采用了一景 GF-1 影像,识别号是 P41/R120,获取时间是 2016 年 1 月 1 日,数据来源于中国资源卫星应用中心。

在 ENVI 平台,首先对 GF-1 多光谱影像和全色影像进行正射校正,再进行 Gram-Schmidt Spectral Sharpening 空谱融合,最后对 Landsat 影像进行几何校正、辐射定标,并采用 LEDAPS 软件进行大气校正等预处理。

表 1 不同季相影像相关信息

Table 1 Related information of images in different seasons

| 季相 | 行列号 | 影像日期 | 成像时间 | 气象温度/℃ | 相对湿度/% | 气压/kPa | 风速/mph |
|----|--------|-------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 旱季 | 132/43 | 2016年4月11日 | 10:00 am | 35 | 56 | 100.6 | 9 |
| 雨季 | 132/43 | 2017年10月23日 | 10:01 am | 28 | 94 | 100.6 | 13 |
| 凉季 | 132/43 | 2017年12月26日 | 10:01 am | 16 | 68 | 101.6 | 15 |

3 方法

3.1 地表温度反演

目前常用的地表温度反演方法包括辐射传导方程^[24]、单窗算法^[6]和劈窗算法^[25],其中辐射传导方程法因其简单且适用于任何热红外波段被广泛使用。本文选用的热红外影像数据取自 Landsat 系列的 TIRS 载荷,Landsat 8 的 TIRS 传感器提供两个热红外波段,分别是波段 10(10.6~11.19 μm)和波段 11(11.5~12.51 μm),但根据徐涵秋^[26]的研究发现,目前 Landsat 8 的波段 11 的不确定性成倍高于波段 10,因此本文选取波段 10 采用辐射传导方程法进行地表温度反演。该方法根据实时的大气探测数据去除大气对辐射传输的影响,从而获取真实的地表热辐射亮度。公式如下^[27]:

$$L_i = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow} \quad (1)$$

其中: L_i 表示遥感探测器观测的热辐射强度; $B(T_s)$ 表示温度为 T_s (K)时,黑体热辐射亮度; τ 表示大气透射率, L_{\downarrow} 和 L_{\uparrow} 分别表示大气向下辐射亮度和大气向上辐射亮度,这 3 个参数可以从网站 <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov> 查询获得,具体参数见表 2; ε 表示地表比辐射率,采用覃志豪等^[28]人计算 ε 的方法,首先将研究区地表覆被大体分为水体、城镇和自然表面 3 种类型,其中自然地表像元可以看作是由不同比例的裸土和植被组成的混合像元,城镇像

元可看成是由不同比例的建筑物和植被组成的混合像元,分别计算出自然地表像元和城镇像元的植被覆盖度(P_v):

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

当计算自然地表像元的植被覆盖度时,NDVI 为自然地表像元的植被归一化指数值,NDVI_{max} 为自然地表像元类中植被归一化指数最大值,NDVI_{min} 为自然地表像元类中植被归一化指数最小值,城镇像元的植被覆盖度计算方法同上。随后通过式(3)分别估算水体(ε_w)、城镇(ε_b)和自然地表(ε_n)的地表比辐射率:

$$\begin{cases} \varepsilon_w = 0.995 \\ \varepsilon_b = 0.9589 + 0.086P_v - 0.0671P_v^2 \\ \varepsilon_n = 0.9625 + 0.0614P_v - 0.0461P_v^2 \end{cases} \quad (3)$$

在利用式(1)求出 $B(T_s)$ 的基础上,进一步通过式(4)求得地表温度 T_s :

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (4)$$

选取 Landsat 8 影像波段 10 进行地表温度反演,则 K_1 取 $774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, K_2 取 1321.08 K 。

3.2 不透水面比例提取

不透水面比例反演参考数据为不透水面比例反演提供训练和验证数据集,精确提取不透水面比例反演参考数据是不透水面比例反演模型构建的前提。首先基于 GF-1 影像采用面向对象方法^[29]进

表2 LST反演参数

Table 2 LST inversion parameters

| 时间 | τ | $L_{\uparrow}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ | $L_{\downarrow}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ |
|------------|--------|--|--|
| 2016.04.11 | 0.46 | 4.86 | 7.24 |
| 2017.10.23 | 0.52 | 4.34 | 6.33 |
| 2017.12.26 | 0.86 | 1.07 | 1.77 |

行地物分类,通过构建混淆矩阵对分类结果进行精度验证,Kappa系数和总体精度分别是0.843和92.56%,分类精度能够满足不透水面比例反演模型建立和验证需要。随后将分类结果分为不透水面和非不透水面,最后聚合至30 m空间分辨率(与Landsat影像分辨率一致)并统计得到加尔各答市不透水面比例反演参考数据。

在获得不透水面比例反演参考数据的基础上,本文进一步基于随机森林算法^[30]和Landsat影像构建加尔各答市不透水面比例反演模型。为加强研究区地物的识别,本文除采用Landsat影像的5个光谱波段(蓝、绿、红、近红外、中红外波段)外,还构建了6个不透水面的敏感光谱指数(BAI(Building Area Index)^[31]、MNDWI(Modified Normalized Difference Water Index)^[32]、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)^[33]、NDBI(Normalized Difference Vegetation Index)^[34]、SAVI(Soil-Adjusted Vegetation Index)^[35]、IBI(Index-based Built-up Index)^[36]),在此基础上,进行主成分变换并选取第1/2主成分来减弱地物波谱反射相关性。综上,最终选取上述13个变量作为输入变量构建不透水面比例反演模型。随后选取不透水面比例0~100%均匀分布的样本集,以保证模型得到充分训练。最后,选取70%样本集用作模型训练,剩余30%样本集作为独立验证集计算出平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以此来验证反演模型的精度。

3.3 城市热岛比例指数计算

城市热岛比例指数是通过计算城市建成区不同温度等级面积的比例,并赋予权重来表示城市热岛效应程度的一个指标,值越大说明热岛效应程度越大^[37]。通过计算每个季相的城市热岛比例指数(Urban-heat-island Ratio Index, URI)来比较不同季相之间的热岛变化。首先利用Smith等^[38]提出的自然断点法(Natural Breaks)分类,将反演的地表温度分为7个等级,分别为低温、次低温、次中温、中温、次高温、高温、特高温。再通过式(5)计算出城

市热岛比例指数:

$$URI = \frac{1}{100} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (5)$$

其中: m 为划分的地表温度等级数,取值为7; n 为城区高于郊区的温度等级数; i 为城区高于郊区的第 i 个温度等级; w_i 为权重值,取第 i 级的级值; p_i 为第 i 级所占研究区总面积的百分比。通过对比地表温度分级图,可以发现郊区的温度都在次高温以下,则 n 取值为4。

3.4 不透水面比例与地表温度的相关性分析

为了对比分析不同季相地表温度与不透水面比例的相关性,先对各季相不透水面比例与对应的地表温度进行协方差分析,判断两者是否具有相关性。利用式(6)计算出两者的协方差:

$$S_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^N (a_x - u_a)(b_x - u_b)}{N} \quad (6)$$

其中: S_{ab} 为两者的协方差; N 为总像元数; a_x 为第 x 个像元的不透水面比例值; b_x 为第 x 个像元的地表温度值, u_a 和 u_b 分别为研究区不透水面比例和地表温度的均值。协方差系数大于0说明两者具有正相关关系,即一个因素值增加,另一个因素也相应的增加,相反协方差系数小于0说明两者具有负相关关系。但两者的系数值大小不能表示两者之间的相关性程度,只与研究区范围有关。

为进一步定量分析两者的相关性程度,将各季相不透水面比例值以0.01为步长分为100级,统计相应级别对应的地表温度平均值,并采用线性函数、多项式函数、幂指数、指数函数、对数函数和多项式函数分析地表温度和不透水面比例之间的关系,进而对比分析各季相地表温度与不透水面比例相关性。

4 结果与分析

4.1 精度验证

4.1.1 地表温度反演验证

利用Landsat 8影像热红外波段反演得到加尔各答地区各个季相的地表温度,并统计各季相平均温度,见表3。相关研究^[39]表明年平均地表温度与气温的差值很小,所以在获取不到准确地表温度的情况下,有学者^[40]用气温来验证地表温度的反演精度。查阅加尔各答市当时的天气数据,气温分别为35、28、16℃,数据来源于<https://www.timeanddate.com/>。以此为依据对地表反演温度进行精度验证。由于在白天地面温度会大于气温,并存在如

工业区等的热源区域影响,造成反演结果大于实际气温。反演温度的平均值与实际气温差值分别为 0.79、1.33、2.93 °C,反演精度在可接受的范围内,因此利用辐射传导方程法反演的地表温度适用于后面的分析研究。

4.1.2 不透水面比例反演验证

基于 30% 的独立验证样本数据集对不透水面比例反演模型进行精度验证,结果表明各季相不透水面比例反演精度总体较高:平均绝对误差 MAE 分别为 6.7%、7.1% 和 7.2%,均方根误差 RMSE 分别

表 3 研究区地表反演温度统计表(单位:°C)

Table 3 Statistical table of LST in the study area(Unit:°C)

| 日期 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|------------|-------|-------|-------|------|
| 2016.04.11 | 26.54 | 48.99 | 35.79 | 3.39 |
| 2017.10.23 | 20.93 | 41.78 | 29.33 | 2.26 |
| 2017.12.26 | 11.43 | 27.49 | 18.93 | 1.61 |

为 14.65%、14.89% 和 15.03%。进一步检查反演结果(图 2),由于异物同谱现象,反演过程中会存在个别裸土区域反演成不透水面高值区域这种小误差,但不透水面比例反演结果大体满足后续分析要求。

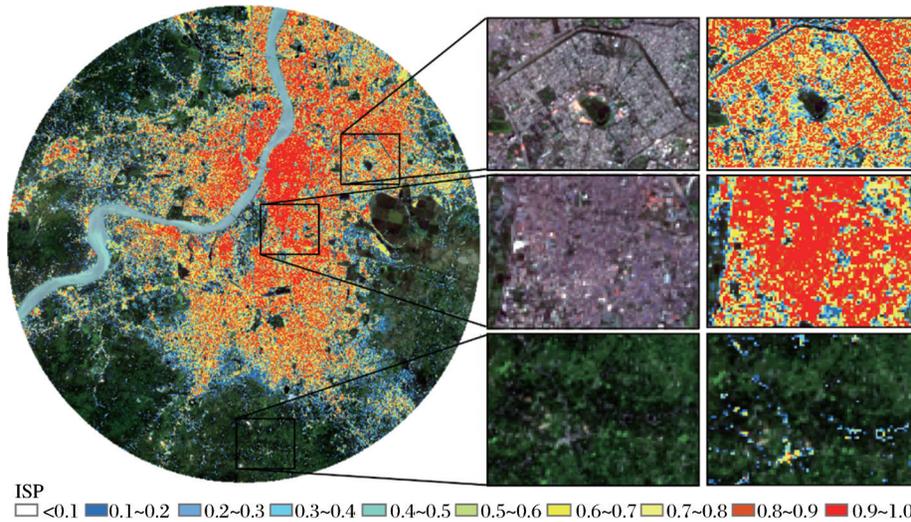


图 2 加尔各答不透水面比例反演结果(底图为真彩色合成 Landsat 8 影像)

Fig.2 The impervious surface percentage in Kolkata (the bottom image is the true color composed image of Landsat 8)

4.2 加尔各答不同季相温度特征

研究区内,茂密植被覆盖区和水体区域表现为低温和较低温区,城市居住区表现为中温及以上(图 3)。大体上,低温和高温分布都比较集中,高温区域集中在建成区,如加尔各答的中央商务区、豪拉火车站附近区域和加尔各答西南部的加登里奇地区等,由城区向郊区逐渐减弱过渡到低温,但城

区中的公园、水体会使温度降低,最低温出现在帕吉勒提河。说明植被和水体对于地表有降温的作用,不透水面对地表有升温的作用。

从不同季节来看(图 4),旱季时,研究区温度从 26.54 °C 到 48.99 °C;特高温区域面积是 39.68 km²,占了研究区 4.93%,是雨季和凉季特高温区域面积的两倍以上;中温、次高温以及高温区域面积分别

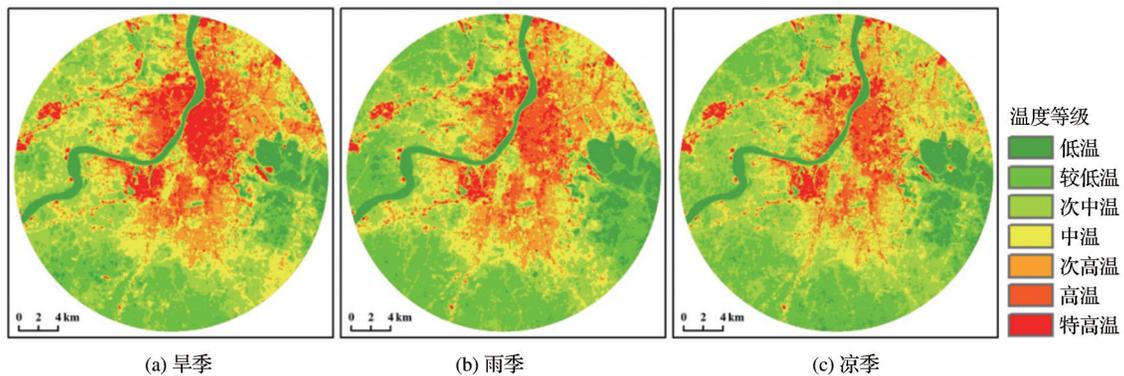


图 3 不同季相地表温度等级图

Fig.3 Land surface temperature grades in different seasons

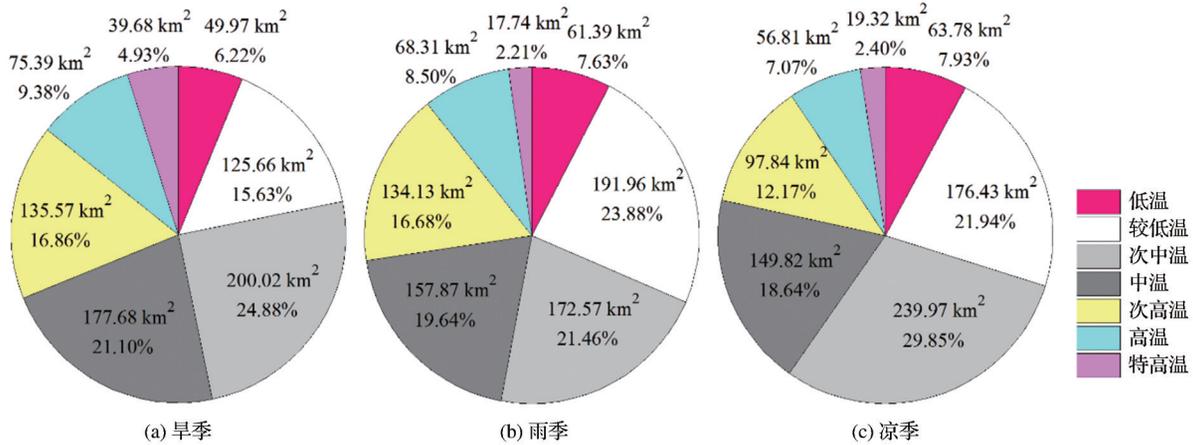


图4 温度等级及所占百分比统计

Fig.4 Area and percentage of different heat island degree

是177.68、135.57、75.39 km²，都比雨季和凉季所占面积多；低温和较低温区域共占了21.85%，是3个季相中所占面积最少的季相。雨季时，研究区温度从20.93℃到41.78℃；较低温区域面积是191.96 km²，比旱季所占比例多了8.25%，比凉季所占面积多了15.53 km²，同时是7个温度等级中所占面积最多的等级；高温和特高温区域共占10.71%，仅仅比凉季多了1.24%；次中温区域面积是172.57 km²，是3个季相中面积最少的季相。凉季时，研究区温度从11.43℃到27.50℃；低温区域面积是63.78 km²，比旱季时多了13.81 km²，同时也是3个季相中所占比例最多的季相；次高温、高温和特高温区域面积一共是173.97 km²，占了研究区21.64%，是3个季相中面积最少的季相；次中温区域占了29.85%，是7个温度等级中所占面积最多的等级。

旱季、雨季和凉季城市热岛比例指数的计算结果分别是0.38、0.33和0.28，说明加尔各答市从旱季到雨季再到凉季总体热岛效应程度呈减少趋势，旱季时城市热岛效应最强，凉季时城市热岛效应最弱。结合温度等级的时空分布，从凉季到雨季，研究区东北部区域中温区域逐渐被次高温区域取代，再到旱季时次高温区域出现零星高温区域。以豪

拉火车站为中心的豪拉区域和加尔各答市中区的中央商务区旱季时大体全为特高温区域，雨季和凉季时由特高温和高温区域构成，雨季主要是特高温区域占主导，凉季由高温区域占主导。研究区南部的城区与郊区交界处，凉季时次高温区域零星分布，到旱季时次高温区域增多。因此，旱季时高温区和特高温区所占比例大，热岛效应程度最强。

4.3 加尔各答不同季相温度特征与不透水面的关系

本文通过计算出不同季相地表温度与不透水面比例的协方差来了解两者之间的相关性。旱季时两者的协方差是0.68，雨季时是0.49，凉季时是0.33。说明在每个季相，地表温度与不透水面比例都呈正相关，当不透水面比例增加时，地表温度随之增加。本文同时在研究区随机生成40个点，观察对应的不透水面比例和地表温度值，从图5可以看出随机点地表温度的变化趋势和不透水面比例变化趋势一样，不透水面比例高，地表温度高，不透水面比例低，地表温度也低。为进一步定量不透水面比例与地表温度的关系，采用多种回归模型分析地表温度和不透水面比例之间的关系。

从表4可以看出，不透水面比例与地表温度在多项式函数模型拟合程度最好，各季相的相关系数

表4 地表温度与不透水面比例的多种回归模型对比

Table 4 Comparison of multiple regression models for land surface temperature and impervious surface percentage

| 回归模型 | 旱季 | | 雨季 | | 凉季 | |
|---------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | 回归方程 | R ² | 回归方程 | R ² | 回归方程 | R ² |
| 多项式函数模型 | $y=3.68x^2+1.60x+35.65$ | 0.916 | $y=1.49x^2+2.02x+28.87$ | 0.917 | $y=2.26x^2+0.35x+18.63$ | 0.923 |
| 指数函数模型 | $y=35.10e^{0.14x}$ | 0.896 | $y=28.651e^{0.12x}$ | 0.912 | $y=18.29e^{0.13x}$ | 0.893 |
| 线性函数模型 | $y=5.33x+35.02$ | 0.888 | $y=3.53x+28.61$ | 0.907 | $y=2.63x+18.25$ | 0.880 |
| 幂函数模型 | $y=39.15x^{0.04}$ | 0.730 | $y=31.37x^{0.03}$ | 0.775 | $y=20.26x^{0.04}$ | 0.677 |
| 对数函数模型 | $y=1.48\ln(x)+39.15$ | 0.704 | $y=1.01\ln(x)+31.37$ | 0.754 | $y=0.71\ln(x)+20.26$ | 0.653 |

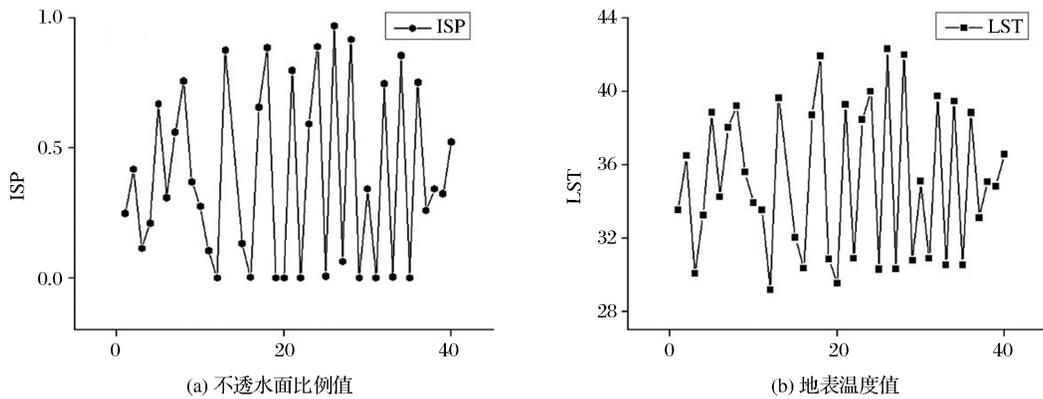


图 5 随机点不透水面比例和地表温度值

Fig.5 The values of impervious surface percentage and land surface temperature at random points

R^2 都在 0.91 以上,指数函数次之,对数函数模型拟合效果最差。图 6 可以观察到在多项式函数模型下两者的关系。

从图 6 可以看出,旱季、雨季和凉季地表温度均呈现随着不透水面比例增加先快速上升,后缓慢增加,最后急剧增加的趋势。其中旱季时,随着不透水面比例从 0 增加到 0.66,地表温度快速增加至 38.4 °C,随后在不透水面比例从 0.66 增加至 0.83,地表温度仅增加 0.3 °C,然而,当不透水面比例增加至 0.83 后,随着进一步增加,地表温度急速上升至

41.9 °C。对比雨季和凉季也发现同样的变化趋势,在雨季,随着不透水面比例从 0 增加到 0.59,地表温度快速增加至 30.8 °C,随后在不透水面比例从 0.59 增加至 0.79,地表温度仅增加 0.3 °C,不透水面比例进一步增加,地表温度急速上升至 33.4 °C;在凉季,随着不透水面比例从 0 增加到 0.60,地表温度快速增加至 19.8 °C,随后在不透水面比例从 0.60 增加至 0.82,地表温度仅增加 0.3 °C,然而,当不透水面比例增加至 0.82 后,随着进一步增加,地表温度急速上升至 22.1 °C。

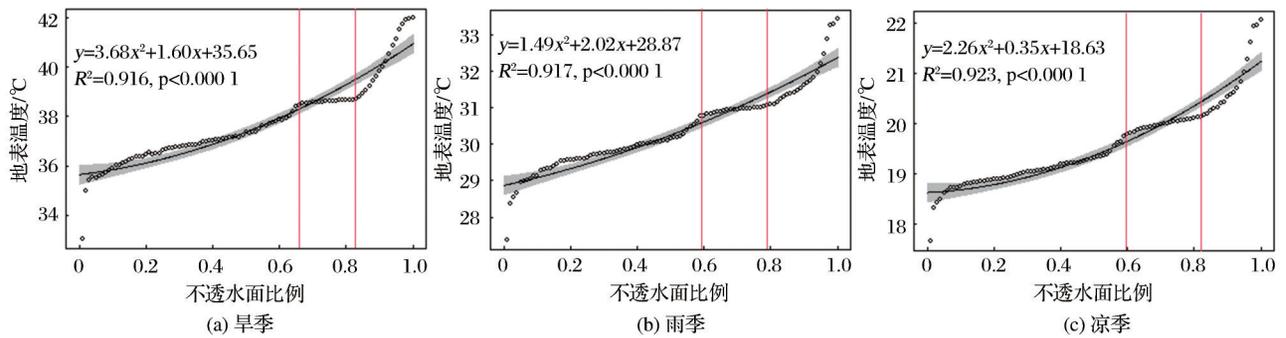


图 6 加尔各答市不同季相地表温度与不透水面比例的关系

Fig.6 The relationship between land surface temperature and impervious surface percentage of different seasons in Kolkata

进一步观察不透水面比例增加与地表温度上升的关系。从图 7 可以看出,随着不透水面比例的增加,地表温度和增加值也随之增加,但不同季相不透水面比例对应的地表温度增加值有所不同。旱季时,地表温度增加值的平均值为 0.53 °C,并且地表温度增加值的增长速度最快,不透水面比例从 0.9 增加到 1 时,地表温度增加值为 0.86 °C,是雨季和凉季时地表温度增加值的 1.8 倍左右;雨季时,地表温度增加值的平均值高于凉季,为 0.35 °C,但地表温度增加值的增长速度最慢,因为最开始的地表

温度增加值是最大的,为 0.22 °C,最后仅为 0.49 °C;凉季时,地表温度增加值的平均值是最小的,仅为 0.26 °C,但地表温度增加值的增长速度高于雨季,地表温度增加值从一开始的 0.09 °C 增长到 0.46 °C。综上所述,不透水面比例的增加,相应的地表温度也会不同程度的上升,随着不透水面比例的增加,旱季时地表温度增长最快,雨季时地表温度增长次之,凉季时地表温度增长最慢,不透水面比例每增加 0.1,旱季时地表温度增加 0.53 °C,雨季时增加 0.35 °C,凉季增加 0.26 °C。

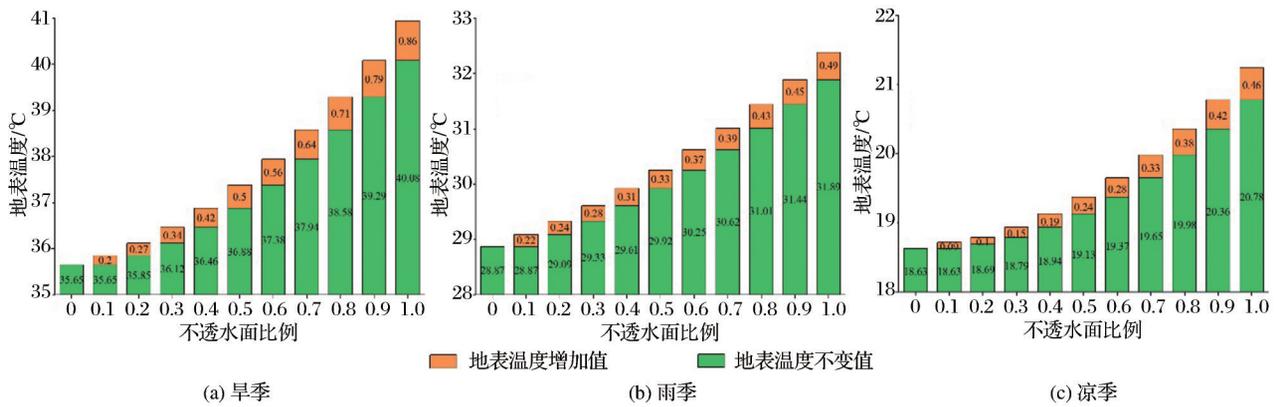


图7 不同季相不透水面比例与地表温度变化情况

Fig.7 Change of land surface temperature with impervious surface percentage in different seasons

5 讨论与结论

5.1 讨论

地表温度是个复杂的生态参数,它与地表覆被的理化性质紧密相关,其中植被和水体对地表温度有降温作用^[41],不透水面对地表温度有升温作用^[42],吴昌广等^[43]研究发现深圳市西部地区不同季节不透水面比例与地表温度之间呈指数函数关系,随着不透水面比例增加,地表温度上升加快。但本文研究发现每个季节在不透水面比例区间大致在0.6~0.8之间时,地表温度出现缓慢增加的趋势,这是因为不同植被、水体和不透水面的比例关系,导致了不透水面比例的变化与温度的变化的非线性关系,由于本文不透水面比例与地表温度相关性是通过反演结果统计得出的,仅反映了总体趋势,如需深入探索植被、水体、不透水面的组合导致的不透水面变化及其带来的地表温度之间的时空关系,得出较为准确的结论,还需要考虑到像元组成的异质性,采用更高分辨率遥感数据,探索不同覆被类型比例组成与地表温度之间的关系,这还需要进一步的研究。其次,现有关于不同时间序列地表温度的研究都是用某一时刻的地表温度表征特定季节或年份的地表温度,但地表温度要受到当时的天气状况、太阳辐射和下垫面土地覆盖状况的影响,所以本研究选取的是3个季相天气状况基本相同时的影像,以控制其他因素对地表温度的影响,增强结果的可靠性。同时本文在高分辨率不透水面比例参考数据获取方面,充分利用了国产高分辨率卫星数据,探索了其应用潜力。在未来的研究中,还需进一步利用多源国产卫星数据开展更大尺度的研究。总体而言,本文揭示了不同季相加尔各答市地表温度与不透水面比例变化的相关性,可以为孟中

印缅经济走廊城市重大工程布局提供参考。

5.2 结论

本文基于Landsat 8影像第10波段和辐射传导方程法反演了3个季相加尔各答市地表温度,同时利用随机森林算法构建不透水面反演模型得到了加各答市不透水面比例,对比分析不同季相加各答市地表温度特征,并将加各答市地表温度和不透水面比例进行回归分析,得到如下结论:

(1)研究区内,茂密植被覆盖区和水体区域表现为低温和较低温区,城市居住区表现为中温及以上。大体上,低温和高温分布都比较集中,高温区域集中在建成区。

(2)旱季时,研究区温度从26.54°C到48.99°C,在3个季相中旱季低温和较低温区域所占面积最少;雨季时,研究区温度从20.93°C到41.78°C,在3个季相中雨季次中温区域所占面积最少;凉季时,研究区温度从11.43°C到27.50°C,在3个季相中凉季次高温、高温和特高温区域所占面积最少。加各答市从旱季到雨季再到凉季总体热岛效应程度一直减少,旱季时城市热岛效应最强,凉季时城市热岛效应最弱。

(3)每个季相,地表温度与不透水面比例都呈正相关,当不透水面比例增加时,地表温度随之增加。旱季时地表温度增长最快,雨季时地表温度增长次之,凉季时地表温度增长最慢,不透水面比例每增加0.1,旱季时地表温度增加0.53°C,雨季时增加0.35°C,凉季增加0.26°C。

参考文献(References):

- [1] Deng C B, Zhu Z. Continuous Subpixel Monitoring of Urban Impervious Surface Using Landsat Time Series[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 238: 110929. doi:10.1016/j.

- rse.2018.10.011.
- [2] Cheng Yuting, Liu Zhaohua, Lu Linlin, *et al.* Spatio-temporal Dynamics of Surface Urban Heat Island in Coastal Mega Cities along the Belt and Road from Remote Sensing Data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(5): 1197-1205.[程雨婷,刘昭华,鹿琳琳,等. 一带一路沿海超大城市热岛时空特征遥感分析[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5):1197-1205.]
- [3] 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. doi:/10.1016/j.rse.2015.11.027.
- [4] Dong Leilei, Pan Jinghu, Wang Weigu, *et al.* Spatio-temporal Pattern of Summer Thermal Field and Its Relationship with Land Cover in Lanzhou based on RS and GWR [J]. *Soils*, 2018, 50(2):404-413.[董磊磊,潘竞虎,王卫国,等. 基于遥感和GWR的兰州中心城区夏季热场格局及与土地覆盖的关系[J]. *土壤*, 2018, 50(2):404-413.]
- [5] Luo Hongxia, Shao Jingan, Zhang Xueqing. Retrieving Land Surface Temperature based on the Radioactive Transfer Equation in the Middle Reaches of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources Science*, 2012, 34(2): 256-264.[罗红霞,邵景安,张雪清. 基于辐射传导方程的三峡库区腹地地表温度的遥感反演[J]. *资源科学*, 2012, 34(2):256-264.]
- [6] Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, *et al.* Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 68(4): 456-466.[覃志豪, Zhang M H, 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, 68(4):456-466.]
- [7] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4):434-440.
- [8] Duan Jinlong, Song Xuan, Zhang Xuelei. Spatio-temporal Variation of Urban Heat Island in Zhengzhou City based on RS [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 165-170.[段金龙,宋轩,张学雷. 基于RS的郑州市城市热岛效应时空演变[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1):165-170.]
- [9] Zhang Jianming, Wang Penglong, Ma Ning, *et al.* Spatial-temporal Evolution of Urban Heat Island Effect in Basin Valley—A Case Study of Lanzhou City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1530-1537.[张建明,王鹏龙,马宁,等. 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*, 2012, 32(12):1530-1537.]
- [10] Gong Zhen, Hu Youjian, Li Hua. Study of Temporal and Spatial Distribution of Thermal Environment in Wuhan City [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(6): 84-86, 101. [龚珍,胡友健,黎华. 武汉市热环境时空分布特征[J]. *测绘科学*, 2016, 41(6):84-86,101.]
- [11] Weng Q H, Liu H, Lu D S. Assessing the Effects of Land Use and Land Cover Patterns on Thermal Conditions Using Landscape Metrics in City of Indianapolis, United States [J]. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(2): 203-219. doi:/10.1007/s11252-007-0020-0.
- [12] Weng Q H, Lu D S, Schubring J. Estimation of Land Surface Temperature-vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4):467-483. doi:/10.1016/j.rse.2003.11.005.
- [13] Xia Junshi, Du Peijun, Zhang Hairong, *et al.* The Quantitative Relationship between Land Surface Temperature and Land Cover Types based on Remotely Sensed Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 15-23.[夏俊士,杜培军,张海荣,等. 基于遥感数据的城市地表温度与土地覆盖定量研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1):15-23.]
- [14] Xu Hanqiu. Quantitative Analysis on the Relationship of Urban Impervious Surface with other Components of the Urban Ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2456-2462.[徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(5):2456-2462.]
- [15] Zhang Y S, Odeh I O A, Han C F. Bi-temporal Characterization of Land Surface Temperature in Relation to Impervious Surface Area, NDVI and NDBI, Using a Sub-pixel Image Analysis [J]. *Chinese Journal of Osteoporosis*, 2009, 11(4): 256-264. doi:/10.1016/j.jag. 2009. 03.001.
- [16] 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 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 375-386. doi:/10.1016/j.rse.2006.09.003.
- [17] Zhou Chuncheng, Zhang Youshui, Huang Huanhuan. Impacts of Impervious Surface Area and Landscape Metrics on Urban Heat Environment in Fuzhou City, China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(3):490-498.[邹春城,张友水,黄欢欢. 福州市城市不透水面景观指数与城市热环境关系分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(3):490-498.]
- [18] Yue Wenzhe. Study on Urban Landscape Pattern and Its Thermal Environment Effect based on Remote Sensing Image [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.[岳文泽. 基于遥感影像的城市景观格局及其热环境效应研究[D]. 上海:华东师范大学,2005.]
- [19] National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China, Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Vision and Actions on Jointly Building Silk Road Economic Belt and 21st-Century Maritime Silk Road [J]. *Finance and Accounting for Communications*, 2015(4): 20-20.[国家发展改革委,外交部,商务部. 推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动[J]. *交通财会*, 2015(4):20-20.]
- [20] Chen Lijun. BCIM Economic Corridor and the Construction of "One Belt, One Road" [J]. *Southeast Asian and South Asian Studies*, 2015(4):54-62,109.[陈利君. 孟中印缅经济走廊与“一带一路”建设[J]. *东南亚南亚研究*, 2015(4):54-62,109.]

- [21] Bhatta B. Analysis of Urban Growth Pattern Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Kolkata, India[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(18): 4733-4746. doi:/10.1080/01431160802651967.
- [22] Dasgupta S, Gosain A K, Rao S, *et al.* A Megacity in a Changing Climate: the Case of Kolkata[J]. Climatic Change, 2013, 116(3-4): 747-766. doi:/10.1007/s10584-012-0516-3.
- [23] Pattanaik D R, Kumar A. Prediction of Summer Monsoon Rainfall over India Using the NCEP Climate Forecast System [J]. Climate Dynamics, 2010, 34(4): 557-572. doi:/10.1007/s00382-009-0648-y.
- [24] Ding Feng, Xu Hanqiu. Comparison of Two New Algorithms for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Thermal Band[J]. Geo-Information Science, 2006(3): 125-130, 135. [丁凤, 徐涵秋. TM热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学, 2006(3): 125-130, 135.]
- [25] Qin Zhihao, Karnieli A. Split Window Algorithms for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-AVHRR Data [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2001, 13(2): 33-42. [覃志豪, Arnon Karnieli. 用NOAA-AVHRR热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感, 2001, 13(2): 33-42.]
- [26] Xu Hanqiu. Retrieval of Reflectance and Land Surface Temperature of the Newly-launched Landsat 8 Satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 741-747. [徐涵秋. 新型Landsat 8卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747.]
- [27] Mao Kebiao, Tang HuaJun, Zhou Qingbo, *et al.* Retrieving Land Surface Temperature from MODIS Data by Using Radiance Transfer Equation [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2007, 43(4): 12-17. [毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 用辐射传输方程从MODIS数据中反演地表温度的方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 12-17.]
- [28] Tan Zhihao, Li Wenjuan, Xu Bin, *et al.* The Estimation of Land Surface Emissivity for Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 16(3): 28-32, 36-41, 74. [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, 74.]
- [29] Zhou Chunyan, Wang Ping, Zhan Zhenyong, *et al.* Classification of Urban Land based on Object-oriented Information Extraction Technology [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 31-35, 123. [周春艳, 王萍, 张振勇, 等. 基于面向对象信息提取技术的城市用地分类[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 31-35, 123.]
- [30] Leo B. Random Forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [31] Shahi K, Shafri H Z M, Taherzadeh E, *et al.* A Novel Spectral Index to Automatically Extract Road Networks from WorldView-2 Satellite Imagery [J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Sciences, 2015, 18(1): 27-33. doi:/10.1016/j.ejrs.2014.12.003.
- [32] Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.]
- [33] Kaufman Y J, Tanré D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270. doi:/10.1109/36.134076.
- [34] Cha Yong, Ni Shaoxiang, Yang Shan. An Effective Approach to Automatically Extract Urban Land-use from TM Imagery [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(1): 37-40, 82. [查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 37-40, 82.]
- [35] Huete A R. A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309. doi:/10.1016/0034-4257(88)90106-x.
- [36] Xu H. A New Index for Delineating Built-up Land Features in Satellite Imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269-4276. doi:/10.1080/01431160802039957.
- [37] Xu H Q, Chen B Q. Remote Sensing of the Urban Heat Island and Its Changes in Xiamen City of SE China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(2): 276-281.
- [38] Smith M J D, Goodchild M F, Longley P. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools [M]. 2nd ed. Leicester: Metador, 2007.
- [39] Jiang Huifei, Liao Shuhua, Erike, *et al.* Statistical Analysis on Relationship between Soil Surface Temperature and Air Temperature [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004(3): 1-4. [姜会飞, 廖树华, 叶尔克江, 等. 地面温度与气温关系的统计分析[J]. 中国农业气象, 2004(3): 1-4.]
- [40] Wang Zhi, Dong Bin, Chen Danjun. Surface Parameters Analysis of Shenyang Urban Heat Island based on Landsat [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(10): 4-7, 11. [王植, 董斌, 陈旦君. 基于Landsat的沈阳城市热岛效应与地表参数变化分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 4-7, 11.]
- [41] Yu Zhixi. Urban Ecology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. [于志熙. 城市生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.]
- [42] Xu H Q, Lin D F, Tang F. 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. doi:/10.1002/joc.3554.
- [43] Wu Changguang, Lin Yaoyu, Wang Yaowu, *et al.* Seasonal Variations of Urban Land Surface Thermal Environment and Its Relationship to Land Surface Characteristics [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 26-30. [吴昌广, 林姚宇, 王耀武, 等. 城市地表热环境季节变化及与下垫面特征关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 26-30.]

Seasonal Variations in the Relationship between Land Surface Temperature and Impervious Surface Percentage in Kolkata

Yang Yuting^{1,2,3}, Tang Jiafa¹, Bian Jinhui², Li Ainong², Lei Guangbin²,
Huang Ping³, Jiang Zichun³

(1.Faculty of Geosciences and Environmental Engineering Southwest Jiaotong University,
Chengdu 611756, China;

2.Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3.Institute of Remote Sensing Application Sichuan Academy of Agricultural Sciences,
Chengdu 610066, China)

Abstract: The remarkable feature of urbanization is that the natural surface is constantly replaced by the impervious surface with large heat capacity, which leads to the Urban Heat Island (UHI) and other serious urban ecological problems. The Bangladesh–China–India–Myanmar (BCIM) Economic Corridor is an important road section of the ancient Southern Silk Road and a strategic passage for the construction of the “Belt and Road” Initiative (BRI). Kolkata, located at the strategic position of the BCIM Economic Corridor, is extremely important for the BCIM project. So it is of great significance to research the development of Kolkata and its correlation to Land Surface Temperature (LST) for the construction of the Indian section in the BCIM Economic Corridor. Traditional researches on the relationship between LST and Impervious Surface Percentage (ISP) are mainly based on years, however, few researchers have paid attention to seasonal variations. Based on Landsat images of dry season, rainy season and cool season, this paper retrieved LST and ISP in order to explore and analyze the seasonal variation in the relationship between LST and the ISP. The results indicated that: ① For this study, the distribution of low temperature and high temperature was concentrated, and the high temperature was concentrated in the built-up area, but the low temperature distributed mainly over water body and the area with relatively high vegetation cover; ② The overall UHI effect had been decreasing from dry season to rainy season and then to cool season, and that was strongest in dry season and weakest in cold season; ③ In each season, the LST was positively correlated with ISP. With the increase of the ISP, the LST increased rapidly at first, then slowly, and finally sharply. And when the ISP increased by 0.1, the LST increased by 0.53 °C in dry season, 0.35 °C in rainy season and 0.26 °C in cool season. In summary, the study of thermal environment in Kolkata will be of positive significance to cognition of thermal environment background and ecological effects in India section of BCIM Economic Corridor.

Key words: Land surface temperatures; Impervious surface percentage; Seasonal variation; Regression analysis; Kolkata; BCIM Economic Corridor