

引用格式:刘嘉慧,赵小锋,林剑艺.基于地表能量平衡的厦门岛城市功能区人为热排放分析[J].地球信息科学学报,2018,20(7):1026-1036. [Liu J H, Zhao X F, Lin J Y. Analysis of anthropogenic heat discharge of urban functional regions based on surface energy balance in Xiamen Island[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(7):1026-1036.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170450

基于地表能量平衡的厦门岛城市功能区人为热排放分析

刘嘉慧^{1,2}, 赵小锋^{1,3*}, 林剑艺¹

1. 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 浙江省地理信息中心, 杭州 310012

Analysis of Anthropogenic Heat Discharge of Urban Functional Regions Based on Surface Energy Balance in Xiamen Island

LIU Jiahui^{1,2}, ZHAO Xiaofeng^{1,3*}, LIN Jianyi¹

1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Science, Xiamen 361021, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Geomatics Center of Zhejiang, Hangzhou 310012, China

Abstract: Anthropogenic heat discharge not only constitutes the cause of urban heat island (UHI) formation, but also is an important indicator related to energy consumption. It is important to analysis the magnitude and variation of anthropogenic heat discharge in order to mitigate UHI effect and improve energy efficiency. This paper examined the spatio-temporal variation of anthropogenic heat discharge in the Xiamen Island, China using Landsat TM data and meteorological data. First, the anthropogenic heat discharge was estimated with a remote sensing-based surface energy balance model. Then, the urban functional regions derived from IKONOS data were combined with the anthropogenic heat discharge. The results indicate that the anthropogenic heat discharge in different types of urban functional regions reaches the maximum in summer and the minimum in spring. The anthropogenic heat discharge of industrial area was higher than those in the other regions for all seasons. The high anthropogenic heat discharge occurred in the old industrial bases in the west of Xiamen Island. In traffic area, high anthropogenic heat discharge was observed in the Changan Road, Jiahe Road, Chenggong Avenue, Xianyu Road, North Hubin Road-Lvling Road, South Hubin Road-East Lianqian Road. In residential area, high anthropogenic heat discharge was observed in the old town. The high anthropogenic heat discharge occurred in the large single buildings in commercial and public area. Overall, the anthropogenic heat discharge in the western part of Xiamen Island was higher than that in the east. The differences of spatial and seasonal distribution were closely related to land cover types, population and the degree of economic development. Moreover, the density and height of the buildings and materials of land cover change the amount of anthropogenic heat discharge by affecting other surface fluxes. This paper brings a more microscopic perspective by analyzing the spatio-temporal variation of anthropogenic heat discharge in different urban functional regions

收稿日期 2017-09-26;修回日期:2018-02-12.

基金项目 :国家自然科学基金项目(41371392,71573242,71273252)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41371392, 71573242, 71273252.]

作者简介 刘嘉慧(1992-),女,硕士生,主要从事城市环境遥感与GIS研究。E-mail: jhliu@iue.ac.cn

*通讯作者 赵小锋(1981-),男,博士,副研究员,主要从事城市环境遥感与GIS。E-mail: xfzhao@iue.ac.cn

to study urban thermal environment and energy utilization, as well as to provide a theoretical basis for promoting urban sustainable development.

Key words: anthropogenic heat discharge; spatio-temporal variation; urban functional regions; surface energy balance; Xiamen Island

***Corresponding author:** ZHAO Xiaofeng, E-mail: xfzhao@iue.ac.cn

摘要: 人为热排放不仅是城市热岛形成的重要因子,而且是与能源消耗密切相关的指标,对其大小和变化特征进行分析有利于减缓城市热岛与节能减排。本文以厦门岛为研究区,利用2009年多时相的Landsat TM影像和地表能量平衡模型反演出不同季节的人为热排放,在此基础上结合IKONOS影像解译的城市功能区,分析不同类型城市功能区人为热排放的时空变化特征。结果表明:不同类型城市功能区的人为热排放均在夏季达到最大,春季最小;工业区的人为热排放一直高于其他类型的城市功能区;工业区人为热排放高值区主要集中在厦门岛西部传统的重点工业区,交通区人为热排放高值区的空间分布与厦门岛“三纵四横”的交通干线分布格局相吻合,居住区人为热排放高值区主要集中在旧城区,商业及公共设施区人为热排放高值区主要集中在单体建筑大的商圈和公共设施;总体上厦门岛西部的人为热排放比东部要高。这种时空分布的差异性与用地类型、人口数量与经济发展程度密切相关,而且建筑物的密度、高度和下垫面的材料通过影响其他地表通量来改变人为热排放的大小。通过分析不同城市功能区人为热排放的时空变化特征,可以从更微观的角度理解城市热环境和能源利用现状,为促进城市可持续发展提供理论依据。

关键词: 人为热排放;时空变化;城市功能区;地表能量平衡;厦门岛

1 引言

随着城市中人类活动愈加频繁,城市热岛效应日益明显,对城市气候与环境、能源消耗和居民健康产生重要影响^[1-5]。人为热排放是导致城市热岛效应的重要原因之一^[6],它是指人们对能源的不充分利用而排放到周边环境中的废热^[7-8]。研究表明人为热排放对城市热岛效应具有很大的贡献:东京地区的人为热排放使市中心白天的城市热岛强度增加1℃,夜晚强度增加2~3℃^[9];费城的人为热排在冬季可以使夜间城市热岛强度增加2~3℃^[10];北京的人为热排放使白天城市中心温度增加0.5℃左右,夜晚增加1~3℃左右^[11]。研究人为热排放的大小和时空变化规律,不仅有利于从生态环境的角度识别城市热污染源的空间分布及动态特征,而且可以从节能减排的角度反映城市中能源利用的水平。

国内外已有不少学者对不同尺度的人为热排放进行了定量研究^[12-17],其研究方法可分为3类:能源消耗清单法、建筑物能耗模型法和地表能量平衡法。就城市尺度而言,相较于前面的两种方法,基于遥感的地表能量平衡法数据获取容易,而且根据所选遥感数据源能够估算出高分辨率的人为热排放,有利于发现人为热排放在城市内部的空间分布特征。Zhou等^[15]使用ASTER影像和地表能量平衡法,估算出Indianapolis地区夏季的人为热排放为

32 W/m²,且人为热排放与建筑能耗的空间格局相一致;Kato等^[16]利用ASTER、ETM+影像及气象数据对名古屋的人为热排放采用能量平衡余值法进行估算,结果显示,夏季的人为热排放在市中心超过100 W/m²,且冬夏两季人为热排放明显大于春秋两季,这同该地区的能耗变化相吻合;Wong等^[17]基于地表能量平衡法利用HJ-1B对香港秋季和冬季的人为热排放进行估算,得到的平均人为热排放分别为289.16 W/m²和283.17 W/m²,而且人为热排放与建筑密度、建筑高度相关;Chakraborty等^[18]基于地表能量平衡法分别利用Landsat和MODIS影像估算Delhi地区的人为热排放,得到不透水面人为热排放分别为38 W/m²和62 W/m²;肖捷颖等^[19]利用Landsat TM数据对石家庄市的地表能量平衡进行分析,发现城市中心区人为热最高,高密度不透水面人为热排放均值为41.3 W/m²;朱婷媛^[20]利用Landsat TM遥感影像,基于地表能量平衡方程,获取了杭州市不同年份的人为热排放的空间分布图,发现人为热排放随着城市化扩展方向在空间上不断扩张,而且在时间上与人口密度、GDP呈正相关关系。然而既有研究均是针对建成区的人为热排放特征进行分析,缺乏对于建成区内部不同类型城市功能区的人为热排放空间分布进行研究。城市功能区是建成区内部土地使用功能、利用强度、基准地价大体一致的区域,其集约利用程度和使用潜力也应基本相同^[21]。从城市规划的视角来看,掌握

建成区的人为热排放特征有助于从中观层面划定城市开发边界,防止建成区无限扩张;而分析城市功能区的人为热排放特征则是从微观层面针对具体的场所和地块落实相应规划政策,具有可执行性和实用性。定量研究城市功能区人为热排放的时空演变特征,是制定具体可行的城市热岛效应缓解措施和节能减排方案的基础。

本文以厦门岛为研究区,基于多时相 Landsat TM 影像,利用地表能量平衡法估算出不同季节的人为热排放,并利用 IKONOS 影像提取建成区内部不同城市功能区。在此基础上获得不同类型城市功能区的人为热排放,进而分析不同类型城市功能区人为热排放的时空变化特征。本研究对城市热环境分析、能源规划乃至城市可持续发展有重要意义。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

厦门市经纬度范围为 $117^{\circ}53' \sim 118^{\circ}26' E$ 、 $24^{\circ}23' \sim 24^{\circ}54' N$,地处中国东南沿海,位于闽南金三角中部,与漳州、泉州相连,与金门岛隔海相望。地形以滨海平原、台地和丘陵为主,地势由西北山区向东南沿海倾斜;气候属于亚热带海洋性季风气候,年平均气温在 $21^{\circ}C$ 左右。市域由沿厦门湾的大陆部分和厦门岛、鼓浪屿等岛屿以及厦门湾海域组成,全市土地面积 $1699.39 km^2$,其中厦门岛土地面积 $132.5 km^2$ (图1)。改革开放之后,经济的迅速发展,加快了厦门的城市化进程。1981年厦门建成区面积仅为 $12 km^2$,2009年扩大至 $212 km^2$ 。常住人口从2000年的205万增长至2009年的330万,其中城镇人口为142万人^[22]。与此同时,城市热岛的空间范围也逐渐扩大^[23-24],从而对居民生活和城市发展产生了重要的影响。考虑到 IKONOS 影像获取成本及处理分析等因素,本文选择厦门市主城区所在的厦门岛作为研究区。

2.2 数据源及预处理

本文所用遥感数据包括 Landsat TM 影像、GLASS 数据产品和 IKONOS 影像。Landsat TM 影像来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),影像获取时间分别为2009年1月13日(冬季)、2009年3月18日(春季)、2009年6月6日(夏季)和2010

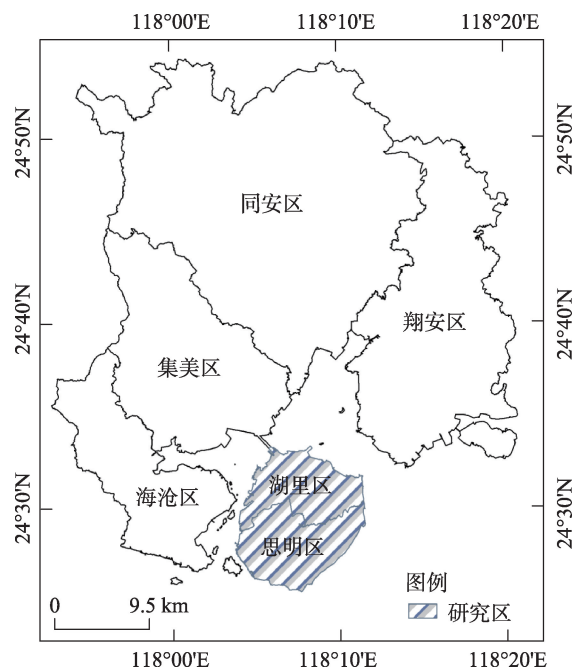


图1 研究区概况图

Fig. 1 The study area of Xiamen Island

年10月31日(秋季)。卫星过境时的研究区上空无云,图像质量较高。GLASS数据产品包括下行短波辐射和光合有效辐射,来源于北京师范大学(<http://glass-product.bnu.edu.cn>),投影为 Sinusoidal 投影,空间分辨率为 $5 km$,时间分辨率为 $3 h$ ^[25]。IKONOS 影像获取时间为2009年1月18日,共有4个波段,包括空间分辨率为 $4 m$ 的3个多光谱波段及空间分辨率为 $1 m$ 的全色波段。

所有 Landsat TM 影像和 GLASS 数据产品均采用 WGS-84 椭球和基准面,精纠正到 UTM 投影坐标系,并重采样为 $30 m$ 分辨率。选择最大似然法将研究区 TM 影像分为6种土地利用类型,即水体、耕地、建设用地(建成区)、裸地、林地和滩涂(图2)。春、夏、秋、冬4景影像的总体分类精度分别为: 83.3% 、 87.2% 、 88.3% 、 87.8% , Kappa 系数均大于 0.8 ,达到 Landsat TM 数据的分类精度要求。在对 IKONOS 影像进行几何校正、数据融合之后,通过目视解译将建成区分为工业区、居住区、商业及公共设施区、交通区4种城市功能区(图3)。

除了遥感数据以外,本研究还需要包括气温、风速、水汽压和大气压强等气象数据。气象数据来自于厦门市气象服务中心提供的逐小时观测数据,选取其中与 Landsat TM 卫星过境时间相近的观测记录(表1)。由于只有一个基准站点的气象

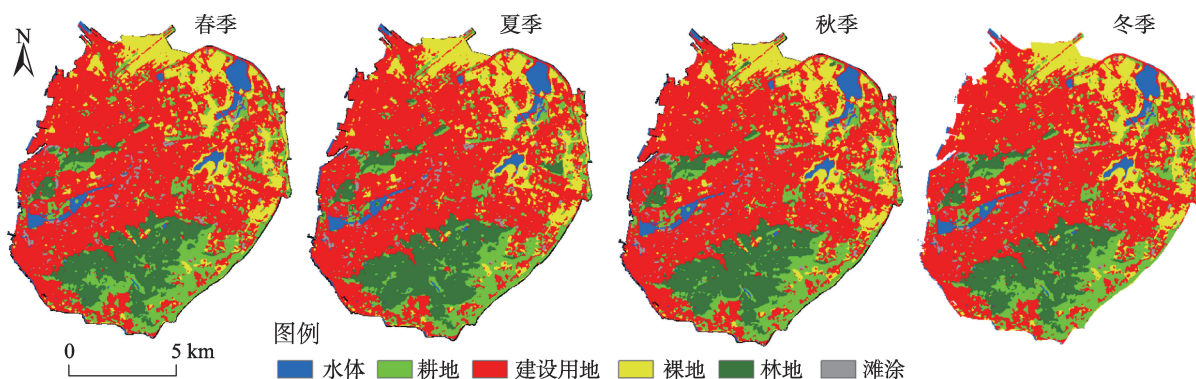


图2 2009年厦门岛不同季节TM影像土地利用分类结果图

Fig. 2 Land use and cover classification maps of Xiamen Island in four seasons in 2009 derived from the TM data



图3 2009年厦门岛 IKONOS 影像土地利用分类结果图

Fig. 3 Land use and cover classification maps of Xiamen Island in 2009 derived from the IKONOS data

表1 气象数据

Tab. 1 Meteorological data

时间	气象数据			
	大气压/ hpa	大气温度/℃	风速/(m/s)	水汽压/hpa
2009-01-13(冬)	1016.6	9.2	3.4	5.1
2009-03-18(春)	998.3	20.8	1.9	16
2009-06-06(夏)	1001.7	28.9	1.8	20.7
2010-10-31(秋)	1019.4	21.3	2.4	8.9

数据和研究区范围相对较小,参考已有文献^[26-27]中的处理方法,本文认为这些气象数据在研究区范围内是常数。

3 研究方法

在城市地区,除了净辐射之外,人类活动在建筑、交通运输和工业生产中的能源消耗所释放的人为热也是地表接收的能量之一。依据热力学第一定律,地表接收的能量通过转换为其他形式的能量使系统保持平衡。这一交换过程可用地表能量平衡方程来表示^[16]。

$$R_n + A = H + LE + G \quad (1)$$

式中: R_n 是地表净辐射; A 是人为热排放; H 是显热通量; LE 为潜热通量; G 为土壤热通量。

3.1 地表净辐射

地表净辐射是指到达地表的太阳总辐射减去被地表反射部分后所得到的辐射差额,是地表能量平衡方程中重要的能量收入部分,可由式(2)计算^[16]。

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + \epsilon \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

式中: α 是地表反照率,由式(3)计算; R_s 是下行短波辐射/(W/m²),可从GLASS产品中获取; ϵ 是地表发射率,与土地利用类型相关,本文参考不同的文献^{[28]-[29]},选取各类土地利用类型地表发射率的典型值,具体取值见表3; ϵ_a 是大气发射率,由Brutsaert提出的经验公式计算^[16]; T_a 是气温/K; T_s 是地表温度/K,由式(4)计算; σ 为斯特芬玻尔兹曼常数,取值 $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$ 。

地表反照率 α 的计算过程是:先将图像各波段DN值转换为大气顶层表观反射率 ρ_i ,再利用Liang^[30]的计算公式将 ρ_i 转换为地表反照率 α 。

$$\alpha = 0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018 \quad (3)$$

反演地表温度 T_s 主要有3步:①对TM影像

的热红外波段进行辐射定标,得到热红外波段的表观辐射亮度值;②使用Coll提出的大气校正模型^[31],将表观辐射亮度值转化为地表真实辐射亮度值 L_{TOA} ;③利用式(4)求得地表温度。其中, K_1 和 K_2 是热红外波段的标定参数。对于Landsat TM影像, $K_1=607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2=1260.56 \text{ K}$ 。

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{TOA}} + 1\right)} \quad (4)$$

3.2 土壤热通量

土壤热通量是土壤表面与下层之间热交换的表征,已有文献^[32-33]表明土壤热通量与地表净辐射之间存在统计关系。Kato等^[16]总结前人的研究,认为土壤热通量可由地表净辐射来估算,提出了一个经验方程:

$$G = c_g R_n \quad (5)$$

式中: G 为土壤热通量/ (W/m^2) ; R_n 是地表净辐射/ (W/m^2) ; c_g 是通过地面观测获得的依赖于土地利用类型和季节的系数。 c_g 的值取决于地物材料的热容量和热导率,高热容量对应低 c_g 值,高热导率对应高 c_g 值。本文的 c_g 值参考了不同文献的结果^[16,34],具体取值见表2。

表2 不同土地覆盖类型和不同季节的 c_g 值

Tab. 2 Coefficient c_g for different surface coverage types and seasons

分类	月份			
	1	3	6	10
建设用地	0.9	0.7	0.6	0.7
裸地	0.3	0.3	0.3	0.3
水体	0.2	0.2	0.2	0.2
农田	0.3	0.3	0.3	0.3
林地	0.13	0.15	0.15	0.15
滩涂	0.3	0.3	0.3	0.3

3.3 显热通量

显热通量是通过传导或对流的方式将地表能量向大气传输,进而对大气加热,由大气与地表之间的能量梯度决定。显热通量 H 可用以下公式进行计算^[16]:

$$H = \rho C_p \frac{T_{aero} - T_a}{r_a} \quad (6)$$

式中: ρ 为空气密度/ (kg/m^3) ; C_p 为定压比热,一般

取值为 $1004 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_{aero} 为冠层空气动力学温度/ K ,难以通过热红外遥感手段获得,本文参照Kato等^[16]的处理方法,使用地表温度 T_s 替代 T_{aero} ; T_a 为空气温度/ K ; r_a 为空气动力学阻力/ (s/m) ,使用简化公式(式(7))计算^[15]。

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{0h}}\right)}{k^2 u_z} \quad (7)$$

式中: z_m 是风速测量仪的测量高度/ m ; z_h 是温度传感器的测量高度/ m ; d 为零平面位移高度/ m ; z_{0m} 为动量传输粗糙度/ m ; z_{0h} 为热量传输粗糙度/ m ; k 是von Karman常数,取值为0.41; u_z 是风速/ (m/s) ,可从气象数据中得到。本文没有对地表粗糙度进行实地测量,参照现有文献的研究结果^[15-16,34],对研究区内6种不同土地利用类型的 z_{0m} 、 z_{0h} 和 d 赋予特征值,如表3所示。

表3 不同土地利用类型的 ε 、 Z_{0m} 、 Z_{0h} 和 d 的值

Tab. 3 ε 、 Z_{0m} 、 Z_{0h} and d for different surface coverage types

分类	建设用地	裸地	水体	农田	林地	滩涂
ε	0.967	0.975	0.995	0.985	0.986	0.998
Z_{0m}	0.33	0.001	0.00003	0.1	0.3	0.001
Z_{0h}	0.0033	0.00002	0.000088	0.001	0.0003	0.00002
d	1.66	0.05	0.05	0.1	1.5	0.05

3.4 潜热通量

潜热通量指下垫面与大气间水汽热交换所吸收的热量,是水分循环的重要组成部分,主要以蒸发散发的形式参与能量循环。本文使用Kato等^[16]提出的公式计算潜热通量 LE 。

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \times \frac{e_s - e_a}{(r_a + r_s)} \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度/ (kg/m^3) ; C_p 为定压比热; e_s 为地表温度 T_s 时的饱和水汽压/hpa,本文参照Kato^[16]等文章中的公式来计算; e_a 是气象基准站测量的空气水汽压/hpa; γ 为干湿球常数/(hpa/k),与空气密度相关; r_a 为空气动力学阻力/(s/m); r_s 是表面阻抗/(s/m),本文参照Nishida等^[35]提出的公式计算。

3.5 人为热排放

根据城市地表能量平衡方程,在得到了地表净辐射 R_n 、土壤热通量 G 、显热通量 H 及潜热通量 LE 后,将人为热排放 A 作为剩余项来进行估算:

$$A = H + LE + G - R_n \quad (9)$$

4 结果与分析

4.1 厦门岛建成区人为热排放的时空变化特征

厦门岛建成区人为热排放分布在春、夏、秋、冬四季的分布和变化情况如图4所示,人为热排放存在明显的季节性和空间差异,其中黑灰色部分为非建成区。利用ArcGIS的空间分析功能,得到建成区春、夏、秋、冬季的人为热排放均值分别是34.4、106.6、66.5和103.3 W/m²,冬、夏季人为热排放明显高于春、秋两季,这与Kato等^[16]在名古屋市的研究结果基本一致。冬、夏两季人为热排放空间上分布较广,春季人为热排放空间上分布最小。冬、夏两季的人为热排放均值虽然数值上相当,但是有区别:夏季人为热排放的主要分布区间为200~400 W/m²,而冬季人为热排放的主要分布区间为100~300 W/m²,且分布面积较大。结合四季的人为热排放的空间分布,可以看出厦门岛西北部的人为热排放四季中一直比其他地区要高,这是因为该地区是港口码头、加工制造区和仓储堆场,大量的物流运输、工业生产释放了大量的废热,形成了人为热排放的高值区。

4.2 不同类型城市功能区人为热排放的时空变化特征

不同类型城市功能区四季人为热排放的平均值和最大值统计结果如表4所示。由表4可看出,4种不同类型城市功能区人为热排放的均值和最大值都是在夏季达到最大,其次是冬季、秋季,最小的是春季。从空间分布上看,不论哪一个季节,工业区人为热排放的平均值和最大值是最大的,其次是交通区、商业及公共设施区,居住区最小。这与厦门市2009年不同部门碳排放大小的排序一致:工业部门>交通运输部门>商业及公共机构>居住生活^[49]。

工业区人为热排放的分布和变化情况如图5所示,可以发现具有显著的空间差异性和季节差异

性(其中黑灰色部分为非建成区和其他类型城市功能区,下同)。夏季厦门岛西北部工业区与东部工业区人为热排放的差别较大,而春季、冬季则差别相对较小。不论哪一个季节,工业区人为热排放的高值区主要集中在厦门岛西北部,即东渡港区、湖里工业区、火炬高新区,以及厦门岛中部的龙山工业区;人为热排放的低值区主要分布在厦门岛东部的以轻工业为主的前埔工业区和一些村镇工业集中区。总体来看,厦门岛工业区人为热排放西部要高于东部,这是因为厦门传统上主要的重点工业区分布在厦门岛西北部,工业用地是逐渐从西部扩张到东部。

由图6可以看出,交通区的人为热排放同样具有明显的季节性和空间性差异。夏季交通区人为热排放空间上分布差异最大,高值区主要集中在300 W/m²以上,分布在机场地区和成功大道以西:自西向东包括长岸路、嘉禾路和成功大道(“三纵”),自北向南包括湖里大道、南山路、仙岳路和湖滨南路(“四横”);秋季交通区人为热排放空间上分布差异较大,除机场地区、长岸路、成功大道和仙岳路之外,其他地区人为热排放多集中在0~100 W/m²之间;春季和冬季的交通区人为热排放空间上分布较为均匀,春季人为热排放主要集中在0~100 W/m²之间,冬季则集中在100~300 W/m²之间。总体上,机场地区和前述“三纵四横”的交通干线人为热排放一直比其他地区高。这是由于机场区和“三纵四横”的路面是沥青路面,其热容量与导热率相对其他地区的水泥路面较大,因此土壤热通量更大,从而人为热排放的值更高。另外也与机场区频繁的航空运输,以及交通干线巨大的车流量相关。

居住区人为热排放分布和变化情况如图7所示,可以发现人为热排放分布具有显著的时空差异性。春季居住区人为热排放基本上小于100 W/m²,在空间上分布最为均匀;秋、冬两季居住区人为热排放空间分布具有高度相似性,但冬季人为热排放

表4 四季不同类型城市功能区人为热排放的平均值和最大值(W/m²)

Tab. 4 Averages and maximums of anthropogenic heat discharge for different types of urban functional regions on four seasons

城市功能区	春季		夏季		秋季		冬季	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
工业区	96.8	298.1	223.7	513.5	158.5	374.1	197.7	394.7
交通区	48.1	294.7	182.4	447.9	115.3	368.9	184.1	396.5
居住区	20.1	247.7	159.8	433.6	82.2	290.4	154.3	321.5
商业及公共设施区	27.9	258.3	172.9	430.2	103.4	350.7	165.8	370.2

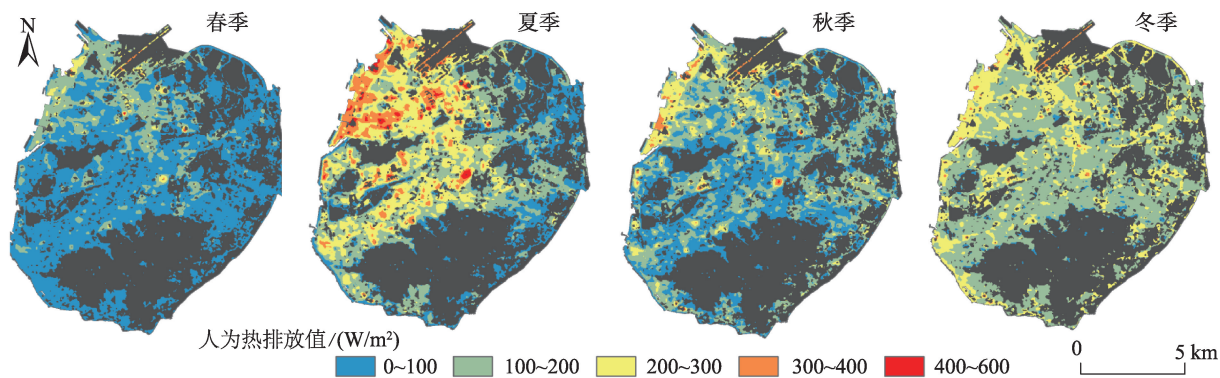


图4 2009年不同季节厦门岛建成区人为热排放分布图

Fig. 4 Anthropogenic heat discharge distribution for built-up area of Xiamen Island in four seasons in 2009

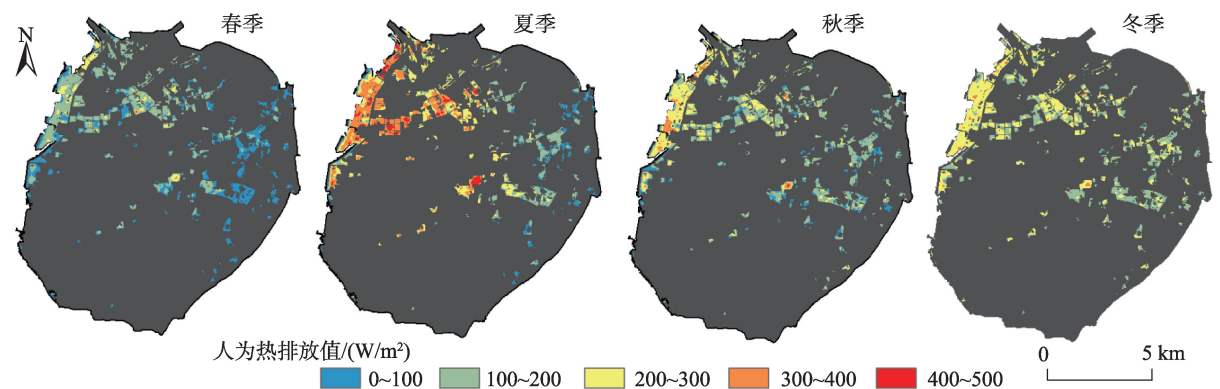


图5 2009年不同季节工业区人为热排放分布图

Fig. 5 Anthropogenic heat discharge distribution for industrial area of Xiamen Island in four seasons in 2009

强度比秋季大;夏季人为热排在空间上分布差异最大,厦门岛西部居住区人为热排放基本大于 200 W/m^2 ,东部则小于 200 W/m^2 。总体上,岛西南部的传统老城区和西部改革开放后建设的经济特区部分的人为热排在四季中比其他地区要高。因为这些居住区人口集中、建筑密度大,所消耗的能源多因而人为热排放大;而且由于建筑物密度大,通风不良,不利于显热通量向外扩散;同时因为建筑老化,导致对太阳辐射的反射率下降,吸收更多的能量转化为显热通量,从而人为热排放也大。

商业及公共设施区人为热排放分布具有显著的空间差异性(图8)。春季和冬季的商业及公共设施区人为热排在空间上分布均匀,但冬季人为热排放主要集中在 $100\sim 300\text{ W/m}^2$ 之间,而春季则基本小于 100 W/m^2 ;夏、秋两季的人为热排放空间分布差异较大,尤其是夏季,空间差异性明显,人为热排放高值区基本覆盖了厦门岛西部的商业及公共设

施区。总体上,厦门岛北部的夏商国际商城、水产市场和酒店超市区,中部的SM商圈、火车站商圈和厦门市体育中心,东部的家具建材城在四季中一直是人为热排放的高值区。这些商圈和公共设施由于单体建筑占地面积大且建筑物高度较之周边偏低,导致动量传输粗糙度和热量传输粗糙度偏低,从而显热通量更大,使得人为热排放的值更高;同时上述高值区人流车流密集,且各类活动频繁,因而人为热排放高。

4.3 地表通量的结果对比

由于城市存在空气温度和风速的分布差异,精确的空间分布气象数据可以减少地表通量的估算误差。但是鉴于多站点气象数据难以获取,本文只利用了一个气象基准站点的数据来估算表通量,因此有必要对本研究估算的地表通量精度进行检验。由于缺乏厦门岛地表通量的测量数据,把本研究的地表通量反演结果与在其他城市的研究结果

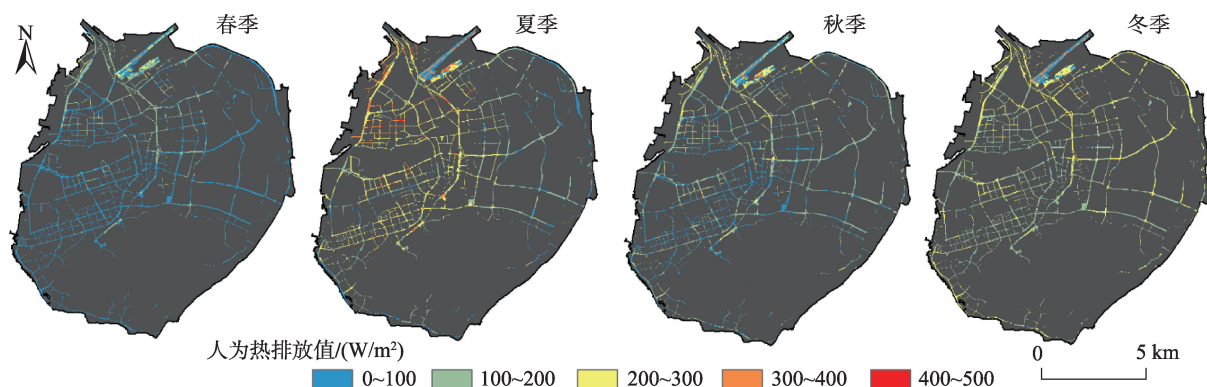


图6 2009年不同季节交通区人为热排放分布图

Fig. 6 Anthropogenic heat discharge distribution for traffic area of Xiamen Island in four seasons in 2009

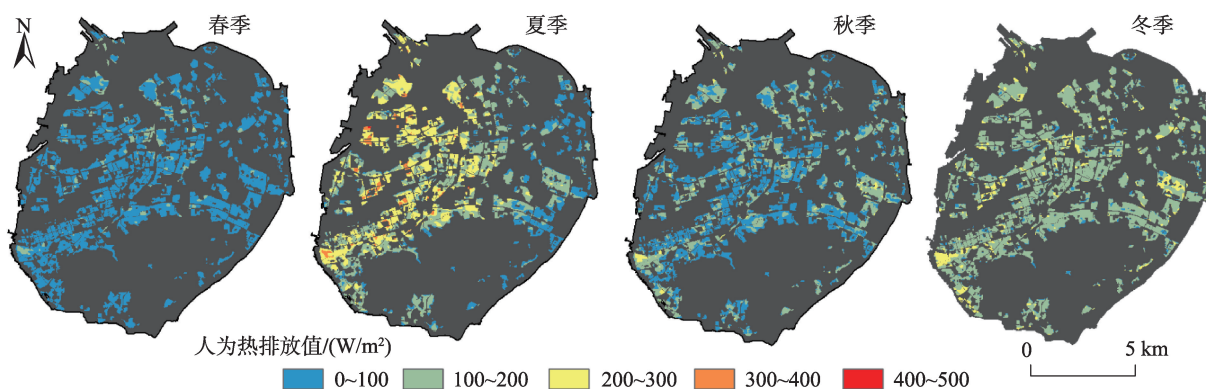


图7 2009年不同季节居住区人为热排放分布图

Fig. 7 Anthropogenic heat discharge distribution for residential area of Xiamen Island in four seasons in 2009

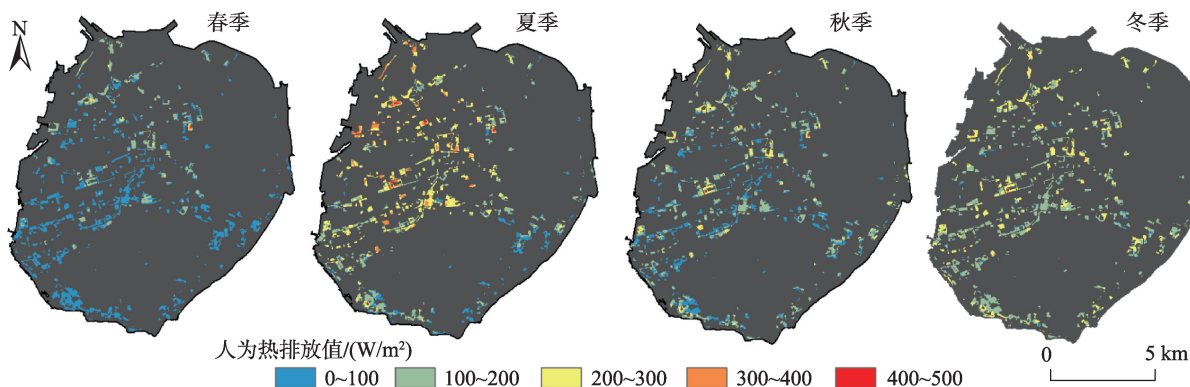


图8 2009年不同季节商业及公共设施区人为热排放分布图

Fig. 8 Anthropogenic heat discharge distribution for commercial and public area of Xiamen Island in four seasons in 2009

进行对比分析(表5)。本研究冬季的显热通量、潜热通量占净辐射的比值分别为0.47和0.02,与名古屋的结果基本一致。本研究夏季的 H/R_n 比名古屋夏季的结果要低,但是又比印第安纳波利斯夏季的结果要高,主要是入射的太阳辐射和地表特征不同

造成的^[38]。本研究中,夏季的 LE/R_n 与名古屋的结果一致,但比印第安纳波利斯的结果要低,这与不透水面的比例有关^[39]。本文的人为热排放反演结果在冬季和夏季都要比名古屋和印第安纳波利斯的结果略高,但是与名古屋的季节变化一致,即夏

表5 本研究与其他研究的地表通量占净辐射
比例结果对比

Tab. 5 Heat fluxes ratios to net radiation between the
present study and previous studies

研究区	时间	H/R _n	LE/R _n	A
厦门岛	2009-01-13	0.47	0.02	103.3
	2009-03-18	0.25	0.01	34.4
	2009-06-06	0.38	0.02	106.6
	2010-10-31	0.34	0.02	66
印第安纳波利斯 ^[15,36]	2012-10-11	0.39	0.18	-
	2001-06-16	0.28	0.23	78
名古屋 ^[16]	2000-07-10	0.56	0.02	99
	2000-12-08	0.46	0.02	82

注:-表示参考文献中无该值的结果

季的人为热排放最大,冬季比夏季略小。通过上述对比分析,发现本研究结果与其他已有的研究结果是吻合的,表明本研究估算的地表通量结果具有可信性。

5 结论与讨论

本文以 Landsat TM 多时相遥感影像为数据源,结合气象数据,利用地表能量平衡法估算出人为热排放;在此基础上,结合 IKONOS 影像解译的厦门岛建成区内部不同类型城市功能区,对不同类型城市功能区的人为热排放的时空变化特征进行分析,得出如下主要结论:

(1)建成区及其内部各种不同类型城市功能区不同季节人为热排放均值排序均为:夏季>冬季>秋季>春季,这是由于夏、冬2个季需要消耗大量能源来制冷和采暖,而春、秋相对较少;每个季节各不同类型城市功能区的人为热排放均值排序均为:工业区>交通区>商服及公共设施区>居住区。

(2)工业区人为热排放高值区主要集中在厦门岛西部传统的重点工业区,工业类型以电子机械、仓储物流为主;交通区人为热排放高值区的空间分布与厦门岛“三纵四横”的交通干线分布格局相吻合;居住区人为热排放高值区主要集中在旧城区,人为热排放强度与人口、建筑密度相关;商业及公共设施区人为热排放高值区主要集中在单体建筑大的商圈和公共设施。从总体上看,不同类型城市功能区人为热排放的空间分布具有一致性,厦门岛西部的人为热排放比东部要高。这是因为西部的经济发展、城市化水平比东部高。

(3)建筑物的密度、高度和下垫面的材料通过影响其他地表通量来改变人为热排放的大小。高密度的建筑群通风不良,不易于显热通量向外扩散;低建筑物的粗糙度较低,其显热通量较大;老建筑比新建筑对太阳辐射的反射率更低,释放更多的显热通量;沥青路面比水泥路面具有更大的热容量与导热率,其土壤热通量更大。总体上,显热通量和土壤热通量的增大导致更高的人为热排放。

由于 IKONOS 影像获取成本及处理分析等因素,本文仅对厦门岛城市功能区的人为热排放时空变化特征进行分析,在后续研究中将收集多景厦门市的高分辨率影像,进一步分析在城市化过程中不同类型城市功能区的人为热排放特征,为改善城市热环境及促进城市可持续发展提供理论依据。由于缺乏厦门岛地表通量的实地测量数据,因此难以直接对人为热排放进行精度验证,目前仅能通过与其他文献的研究结果进行对比分析。Kato 等^[3]对名古屋四季的人为热排放进行遥感估算,结果表明冬、夏两季的人为热排放高于春秋两季,这与本文的研究结果一致。同时,在后续研究中可以争取获得研究区内多个自动观测站的气象数据,通过空间插值的方法,进一步提高地表通量的估算精度。另外,为了提高在建成区地表通量的估算精度,在以后的研究中,将采用混合像元分解法提取建成区不透水面像元中亚像元的植被、水体等其他地物的覆盖度。

参考文献(References):

[1] Agarwal M, Tandon A. Modeling of the urban heat island in the form of mesoscale wind and of its effect on air pollution dispersal[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010,34:2520-2530.

[2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008,319: 756-760.

[3] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool- island intensity of Taipei city parks[J]. Landscape and Urban Planning, 2007,80(4):386-395.

[4] Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. Impact of regional climate change on human health[J]. Nature, 2005,438(17):310-317.

[5] Velazquez-Lozada A, Gonzalez J E, Winter A. Urban heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico[J]. Atmospheric Environment, 2006,40:1731-1741.

[6] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat is-

- land: Comparison of scale model and field observations[J]. *International Journal of Climatology*, 1981,1(3):237-254.
- [7] Butler D. Energy efficiency: Super savers meters to manage the future[J]. *Nature*, 2007,445(7128):586-588.
- [8] United Nations. World Cities Report 2016[R]. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2016.
- [9] Kimura F, Takahashi S. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment[J]. *Atmospheric Environment, Part B. Urban Atmosphere*, 1991,25(2):155-164.
- [10] Fan H, Sailor D. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes[J]. *Atmospheric Environment*, 2005,39:73-84.
- [11] 佟华,刘辉志,桑建国,等.城市人为热对北京热环境的影响[J]. *气候与环境研究*,2004,9(3):409-421. [Tong H, Liu H Z, Sang J G, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004,9(3):409-421.]
- [12] Sailor D J, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas[J]. *Atmospheric Environment*, 2004,38(17):2737-2748.
- [13] 谢旻,朱宽广,王体健,等.中国地区人为热分布特征研究. *中国环境科学*,2015,35(3):728-734. [Xie M, Zhu K G, Wang T J, et al. Study on the distribution of anthropogenic heat flux over China[J]. *China Environmental Science*, 2015,35(3):728-734.]
- [14] Bueno B, Norford L, Pigeon G, et al. Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model[J]. *Boundary-layer Meteorology*, 2011, 140(3):471-489.
- [15] Zhou Y, Weng Q, Gurney K R, et al. Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012,67:65-72.
- [16] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,99(1):44-54.
- [17] Man S W, Yang J, Nichol J, et al. Modeling of anthropogenic heat flux using HJ-1B Chinese small satellite image: A study of heterogeneous urbanized areas in Hong Kong[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015,12(7):1-5.
- [18] Chakraborty S D, Kant Y, Mitra D. Assessment of land surface temperature and heat fluxes over Delhi using remote sensing data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015,148:143-152.
- [19] 肖捷颖,张倩,王燕,等.基于地表能量平衡的城市热环境遥感研究——以石家庄市为例[J]. *地理科学*,2013,34(3):338-343. [Xiao J Y, Zhang Q, Wang Y, et al. Urban surface heat flux analysis based on remote sensing: A case study of Shijiazhuang City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,34(3):338-343.]
- [20] 朱婷媛.基于Landsat遥感影像的杭州城市人为热定量估算研究[D].杭州:浙江大学,2015. [Zhu Y T. Research on quantitative estimation of anthropogenic heat in Hangzhou based on landsat remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.]
- [21] 辜寄蓉,陈先伟,杨海龙.城市功能区划分空间聚类算法研究[J]. *测绘科学*,2011,36(5):65-67. [Gu J R, Chen X W, Yang H L. Spatial clustering algorithm on urban function oriented zone[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011,36(5):65-67.]
- [22] 厦门市统计局. 2009年厦门经济特区年鉴[M].北京:中国统计出版社,2009. [Xiamen Bureau of Statistics, 2009 Year book of Xiamen special economic zone[M]. Beijing: China Statistics Press, China, 2009.]
- [23] Xu H Q, Chen B Q. A study on urban heat island and its spatial relationship with urban expansion: Xiamen, SE China[J]. *Urban Studies*, 2004,11(2):65-70.
- [24] Zhao X F, Huang J C, Ye H, et al. Spatiotemporal changes of the urban heat island of a coastal city in the context of urbanization[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2010,17(4):311-316.
- [25] Liang S L, Zheng T, Liu R, et al. Estimation of incident photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectrometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016,111(D15208):1-13.
- [26] Kato S, Yamaguchi Y, Liu C C, et al. Surface heat balance analysis of Tainan City on March 6, 2001 using ASTER and Formosat-2 data[J]. *Sensors*, 2008,8(9): 6026-6044.
- [27] Kato S, Liu C C, Sun C Y, et al. Comparison of surface heat balance in three cities in Taiwan using Terra ASTER and Formosat-2 RSI data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012,18: 263-273.
- [28] Loveland T R, Merchant J W, Ohlen D O, et al. Development of a land-cover characteristics database for the conterminous United States[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1991,57(11):1453-1463.
- [29] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data[J]. *Re-*

- Remote Sensing of Environment, 2001,75(2):256-266.
- [30] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,76(2):213-238.
- [31] Coll C, Galve J M, Sanchez J M, et al. Validation of landsat- 7/ETM+ thermal- band calibration and atmospheric correction with ground- based measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(1):547-555.
- [32] Clothier B E, Clawson K L, Pinter P J, et al. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986,37(4):319-329.
- [33] Moran M S, Jackson R D, Raymond L H, et al. Mapping surface energy balance components by combining landsat thematic mapper and ground- based meteorological data [J]. Remote Sensing of Environment, 1989,30(1):77-87.
- [34] Hu D. Estimation of urban energy heat flux and anthropogenic heat discharge using aster image and meteorological data: Case study in Beijing metropolitan area[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012,6(1):3559.
- [35] Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003,108(D9):1-14.
- [36] Weng Q, Hu X, Quattrochi D A, et al. Assessing intra-urban surface energy fluxes using remotely sensed ASTER imagery and routine meteorological data: A case study in Indianapolis, USA[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014,7(10):4046-4057.
- [37] 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等.城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例[J].生态学报,2012,32(12):3782-3794. [Lin J Y, Meng F X, Cui S H, et al. Carbon footprint analysis on urban energy use: A case study of Xiamen, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(12):3782-3794.]
- [38] 伍雄昌,张友水,黄美玲,等.利用 Landsat 遥感影像进行福州市地表热通量估算的研究试验[J].遥感信息,2013(2):24-34. [Wu X C, Zhang Y S, Huang M L, et al. Remote sensing study on the surface heat flux in Fuzhou City[J]. Remote Sensing Information, 2013(2):24-34.]
- [39] Liu Y, Shintaro G, Zhuang D, et al. Urban surface heat fluxes infrared remote sensing inversion and their relationship with land use types[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012,22(4):699-715.