

基于遥感的青岛市城市热岛时空变化特征

周甜甜, 廉丽姝, 李宝富, 纪晓璐

曲阜师范大学 地理与旅游学院, 日照 276826

摘要: 随着城市化进程的加快, 城市热岛现象日渐突出, 给人类生产生活带来很大影响, 成为当今社会的热点问题。本文根据 2001 年 1 月—2012 年 12 月共 416 幅 8 天合成地表温度产品 MOD11A2 遥感影像, 以 UHIER 指数为划分标准, 采用密度分割法对地表温度进行等级分类, 并运用相关分析、空间叠加分析和景观格局指数分析等方法, 分析了青岛市城市热岛在日、季节及年际等时间尺度的变化规律和空间分布特征。结果表明: (1) 在时间变化特征方面, 城市热岛具有昼弱夜强的日变化特征; 季节尺度上, 表现为冬强夏弱, 高温区所占面积比例分别为 8.66% 和 5.07%; 年际尺度上, 热岛范围呈现出逐年增大的特点, 高温区面积以每年 15% 的速率增加。(2) 在空间特征方面, 城市热岛主要集中在青岛市区、即墨市南部、胶州市中部以及黄岛区东部; 对城市热岛的景观格局分析发现, 青岛市地表温度向高温化、集中化趋势发展。

关键词: 城市热岛; 时空特征; UHIER 指数; 景观格局; 青岛市

The change of spatial-temporal characteristics of Qingdao urban heat island based on remote sensing

ZHOU Tiantian, LIAN Lishu, LI Baofu, JI Xiaolu

College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China

Abstract: Background, aim, and scope Urban heat island (UHI) is one of the biggest ecological problems in the city at present, but most of the researches are carried out in the case of inland cities, fewer studies of UHI on coastal cities. This paper chooses Qingdao as the research case, using continuous and multi-temporal remote sensing data, systematically analyzes the daily, seasonal and interannual changes of UHI. In addition, by using the landscape pattern index, probed the spatial pattern of UHI of Qingdao city. **Materials and methods** In this paper, we according to 416 roll of MOD11A2 remote sensing image of 2001—2012 years, which is MODIS 8 days synthetic surface temperature product, taking UHIER index as the criteria and by using density segmentation method for the classification of land surface temperature, using the method of correlation analysis, spatial overlay analysis and landscape pattern index to analyze the spatial and temporal characteristics of UHI in Qingdao city. **Results** The results showed that: The UHI of Qingdao city at night is stronger than daytime, the proportion of

收稿日期: 2016-11-04; 录用日期: 2017-01-14

Received Date: 2016-11-04; Accepted Date: 2017-01-14

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2015DL001)

Foundation Item: Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (ZR2015DL001)

通信作者: 廉丽姝, E-mail: llsh8210@163.com

Corresponding Author: LIAN Lishu, E-mail: llsh8210@163.com

引用格式: 周甜甜, 廉丽姝, 李宝富, 等. 2017. 基于遥感的青岛市城市热岛时空变化特征 [J]. 地球环境学报, 8(2): 157-168.

Citation: Zhou T T, Lian L S, Li B F, et al. 2017. The change of spatial-temporal characteristics of Qingdao urban heat island based on remote sensing [J]. Journal of Earth Environment, 8(2): 157-168.

higher temperature during the day is much lower than at night. The UHI is strongest in winter while weakest in summer, the proportion of higher temperature area in winter and summer is 8.66% and 5.07%, respectively. On the annual scale, the phenomenon of UHI showing an increasing trend year by year, the higher temperature area is increasing at the rate of 15% a year. In terms of spatial distribution, UHI mainly concentrate in urban district of Qingdao, south of Jimo, central of Jiaozhou and eastern of Huangdao. The analysis of the landscape pattern index shows that the land surface temperature of Qingdao is developing towards the trend of high temperature and concentration. **Discussion** From the results of the study, the temporal variation of UHI is significantly affected by the land-sea position of Qingdao city, showed greater differences with inland areas. In addition, the spatial distribution characteristics of the study area showed a certain degree of agreement with the topography distribution and land use status of the study area, and the mechanism of its formation needs more in-depth study. **Conclusions** Together with spatial and temporal distribution of the UHI of Qingdao city, we conclude that, in terms of time-varying features, Qingdao as a coastal city, its characteristic of UHI exhibits an opposite feature with inland cities in daily and seasonal characteristics, and showed consistency with other studies of UHI in coastal city. In addition, the landscape pattern index has a good directive significance for revealing the spatial pattern of UHI. **Recommendations and perspectives** The research conclusion both has theoretical significance for understanding the change characteristics and mechanism of UHI in coastal city, and can provide a certain decision basis and direction for the city planning and construction to a certain extent.

Key words: urban heat island; spatial and temporal characteristics; UHIER index; landscape pattern Qingdao city

城市热岛效应是指城市发展到一定规模时,受城市下垫面性质改变、人为热排放以及大气污染等因素的影响,城市内部气温明显高于周围郊区气温的现象。英国气候学家 Howard (1833) 在《伦敦的气候》一书中首次提出城郊气温的差别。Manley (1958) 首次提出“城市热岛”(Urban heat island) 的概念。随着世界各国城市化进程的加快,城市热岛现象越来越明显,目前有关城市热岛效应的研究发现,世界上各类不同等级的城市,无论其纬度位置、海陆位置、地形起伏及其周围的自然环境如何,基本上都能发现城市热岛现象的存在(Arnfield, 2003)。城市热岛效应直接影响城市的住房、交通、建筑及人们的日常生活,对人们的身体健康和经济收入产生很大危害,甚至威胁到整个人类的可持续发展,引起了人们的广泛关注。

关于城市热岛现象已开展了大量研究,研究表明沿海地区由于受海陆风等的影响,城市热岛特征有异于内陆地区,且热岛形成机理较内陆地区更为复杂(苗峻峰, 2014)。但相对内陆城市而言,沿海地区气候条件较优越,对其热岛效应研究的关注度较低。目前,国内对于沿海地区城市热岛的研究多集中于上海、广州等南方大城市。青岛市是中国重要的经济中心和港口城市,城市化水平高,尤其是 20 世纪 90 年代以后,青岛市

进入全新的发展阶段,城市规模急剧扩大,由此引发了一系列的生态响应,城市热岛现象便是其中之一。近些年,关于青岛市城市热环境的研究开始逐渐增多。陈志梅等(2005)、董海鹰等(2012)根据气象观测数据,利用统计分析法对青岛地区的气温变化及城市热岛现象进行研究,发现 20 世纪 90 年代以后的百年间青岛市平均气温呈明显上升趋势,城市热岛强度逐年增强,且秋冬季热岛效应最强,夏季最弱。但受传统研究方法的局限,难以对其空间特征进行细致研究。于臻等(2015)利用 2011 年 1 月、4 月、7 月、12 月的 MODIS 数据分别代表春、夏、秋、冬四季,反演了青岛市地表温度并探讨其与植被覆盖的关系,发现夏、秋季节市区城市热岛效应最明显且与植被覆盖之间呈现显著的负相关关系。马安青等(2015)利用 Landsat 数据来研究青岛地区的城市热岛效应与土地利用之间的关系,发现二者之间关系密切。以上研究初步分析了青岛市的热岛效应变化特征,但由于研究数据的来源及时序长短、研究方法等的不同,研究结论却不尽一致。因此,利用连续的、多时相的遥感地表温度资料,从不同时间尺度上探讨沿海城市热岛效应的动态变化和空间分布特征的研究尚需加强。

本文根据 2001—2012 年共 416 幅时间序列连

续的 MODIS 遥感影像, 分析青岛市城市热岛的日变化、季节变化规律及年际变化趋势, 分析了城市热岛的政区分布特征, 并利用景观格局指数分析法探讨了青岛市热岛景观格局的变化特征, 研究结果可为合理缓解青岛市城市热岛提供一定的决策依据和方向, 同时在一定程度上能够丰富沿海城市的热岛效应理论。

1 研究区概况

青岛市位于山东半岛南部, 地处 $119^{\circ}30'E$ — $121^{\circ}00'E$ 、 $35^{\circ}35'N$ — $37^{\circ}09'N$, 东南部濒临黄海, 其他部分与陆地接壤, 全市总面积约 11282 km^2 , 包括 4 个县级市 (胶州市、即墨市、平度市、莱西市)

和 6 个市辖区 (城阳区、李沧区、市北区、市南区、崂山区、黄岛区) (图 1)。从地质地貌方面来看, 青岛市位于新华夏隆起带次级构造单元地带——胶南隆起区东北缘和胶莱凹陷区中南部, 地势东高西低, 南北两侧隆起, 中间低凹, 全市主要山系有东南部的崂山山脉、北部的大浙山、南部的胶南山群。全市大小河流共 224 条, 大多为独立入海的山溪性小河, 水源基本来源于季节性降水, 主要的水系包括大沽河, 北胶莱河及沿海诸河流。气候类型为暖温带季风性气候, 市区由于受海洋环境的影响, 兼具海洋性气候特点, 四季分明, 温度适中, 空气湿润, 雨量充沛。相比于同纬度地区, 青岛市植物种类繁多, 且受其气候影响, 植被生长良好。

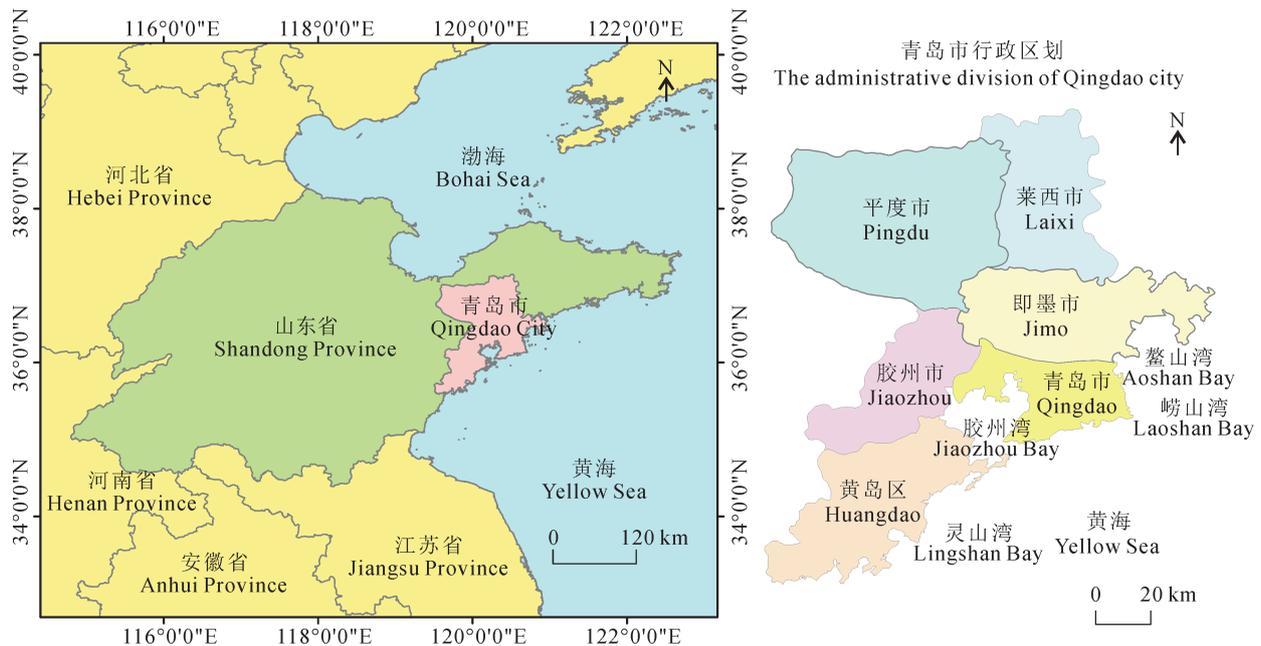


图 1 青岛市地理位置及行政区划

Fig.1 The location and administrative divisions of Qingdao city

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 数据来源

本研究选用 2001—2012 年的地表温度遥感数据 MOD11A2 展开研究。MOD11A2 数据是空间分辨率为 1 km 、8 d 合成的陆地 3 级标准数据, 来源于美国航空航天局 NASA 提供的搭载在 Terra 卫星上的 MODIS 地温产品。Terra 卫星在 $10:30$ (北京时间) 左右和 $22:30$ 左右过境, 分别处于地表的

升温与降温阶段。一天昼夜有两次过境时间, 为研究城市热岛的时间变化尤其是昼夜变化特征提供了可行性条件。另外, 青岛市城市建成区面积数据来自山东省统计年鉴。

2.1.2 数据预处理

对 MODIS 数据产品首先进行投影、校正等预处理。在 ENVI5.1 环境下选用 Modis conversion toolkit 工具对地表温度产品 MOD11A2 进行坐标转换和重投影, 分别选择 (2D) LST_Day_1Km 和 (2D)

LST_Night_1Km 两个数据集, 并利用青岛市行政范围矢量图进行掩膜并裁剪, 然后将经过以上处理的数据利用公式 (1) 进行计算, 得到研究区域的地表温度。

$$T_k = DN \times 0.02 - 273.15 \quad (1)$$

式中: T_k 表示地表温度 ($^{\circ}\text{C}$), DN 表示像元灰度值, 0.02 为数据产品的辐射缩放比。在数据处理过程中, 部分产品在有云地区的 DN 值为 0, 造成这些地区在进行波段运算后的温度为 -273.15°C , 在后期进行平均计算的时候会导致较大误差。针对这种问题, 本文利用 IDL 编程法对多幅遥感影像各个像元的值进行求平均运算, 从而获得不同时间尺度的地表温度, 运算中缺测值区域不参与运算, 从而减小了因为个别数据有缺测值而产生的误差, 提高研究结果可信度。

2.2 研究方法

2.2.1 UHIER 指数

青岛市地表温度分级采用 UHIER 指数法来进行 (王天星等, 2009; Zhang et al, 2013),

UHIER 指数在一定程度上可以反应城市热岛强度, 其计算方法如 (2) 式。

$$UHIER_n = \frac{T_n - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

式中: $UHIER_n$ 表示第 n 个像元的城市热岛强度, T_n 为第 n 个像元的地表温度值, T_{\max} 表示青岛市地表温度的最大值, T_{\min} 表示青岛市地表温度的最小值。

经过计算得到的 $UHIER_n$ 值介于 0—1, 根据 $UHIER_n$ 值采用密度分割法将青岛市地表温度划分为 5 个等级, 依次为低温区 (I)、较低温区 (II)、中温区 (III)、较高温区 (IV)、高温区 (V), 划分标准如表 1 所示。依照各温度等级的含义, 中温区可看作青岛市地表温度的平均值, 那么低温区、较低温区与中温区表示未出现城市热岛, 较高温区与高温区则对城市热岛影响较大 (黄聚聪等, 2011), 尤其高温区的分布更具决定作用。本文以高温区代表强热岛区, 较高温区代表弱热岛区分析了青岛市城市热岛效应的时空特征。

表 1 温度等级分类标准

Tab.1 The criteria of temperature classification

地表温度等级	The class of land surface temperature	UHIER 值范围	The range of UHIER
低温区 (I)	Lower temperature area	$UHIER_n < UHIER_{\text{mean}} - 1.5S$	
较低温区 (II)	Low temperature area	$UHIER_{\text{mean}} - 1.5S < UHIER_n < UHIER_{\text{mean}} - 0.5S$	
中温区 (III)	Middle temperature area	$UHIER_{\text{mean}} - 0.5S < UHIER_n < UHIER_{\text{mean}} + 0.5S$	
较高温区 (IV)	High temperature area	$UHIER_{\text{mean}} + 0.5S < UHIER_n < UHIER_{\text{mean}} + 1.5S$	
高温区 (V)	Higher temperature area	$UHIER_n > UHIER_{\text{mean}} + 1.5S$	

注: $UHIER_{\text{mean}}$ 表示所有像元的 UHIER 平均值, S 表示标准差。

Note: $UHIER_{\text{mean}}$ represent the mean value of UHIER of all pixel, S represent standard deviation.

2.2.2 景观格局分析法

景观格局指数具有多样化的特点 (陈云浩等, 2004), 能够从斑块、类型和景观三方面对热岛的格局进行系统而全面的表述, 成为近几年研究城市热岛空间格局的新手段 (陈利顶等, 2008; 但尚铭等, 2011; 徐双等, 2015)。

本文利用景观生态学原理, 通过 Fragstats3.4 景观格局分析软件, 分别在类型水平和景观水平上选取一定数量的景观指数, 分析了青岛市 2001—2012 年城市热岛景观格局的变化特征。其中, 斑块类型水平指数反映了对热岛效应起主导作用的较高温区和高温区 (分别代表弱热岛区和

强热岛区) 斑块类型的数量与结构, 景观水平上的指数可以反映城市热环境的整体特征 (Weng, 2009)。表 2 为本文选取的景观格局指数, 分别从数量、形态和结构特征几个方面描述了青岛市城市热岛的空间格局和变化特征。

3 结果与分析

3.1 城市热岛的时间变化特征

3.1.1 日变化

通过对青岛市 2001—2012 年白天、夜晚地表温度数据的预处理和统计分析, 得到青岛市昼、夜各温度等级所占总区域的面积比例 (图 2)。

表 2 景观指数及其英文简称和代表意义
Tab.2 Landscape metrics with its English abbreviation and representative meaning

	景观指数 Landscape metrics	代表意义 Representative meaning
类型水平 Landscape metrics on class level	斑块类型面积 (CA) Class area	热岛景观斑块类型面积 The area of a patch type of heat island landscape
	斑块个数 (NP) The number of patches	研究区内各斑块类型的个数 The number of patches in the study area
	最大斑块指数 (LPI) Largest patch index	最大斑块占研究区该类斑块总面积的比例 The largest patch accounted for the proportion of the patches in the total study area
景观水平 Landscape metrics on landscape level	形状指数 (SHAPE_AM) Area-weighted mean shape index	描述某斑块类型形状的复杂程度 Describe the complexity of the shape of patches
	形状指数 (SHAPE_AM) Area-weighted mean shape index	斑块形状的总体复杂程度 The overall complexity of the shape of patches
	香农多样性指数 (SHDI) Shannon's diversity index	描述斑块类型的丰富程度 Describe the richness of patch type
	散布与并列指数 (IJI) Interspersion and Juxtaposition index	景观中各类斑块的混合分布程度 The mixed distribution of various types of patches in the landscape
	蔓延度 (CONTAG) Contagion index	景观中各类斑块间的蔓延趋势 The spread trend of various types of patches

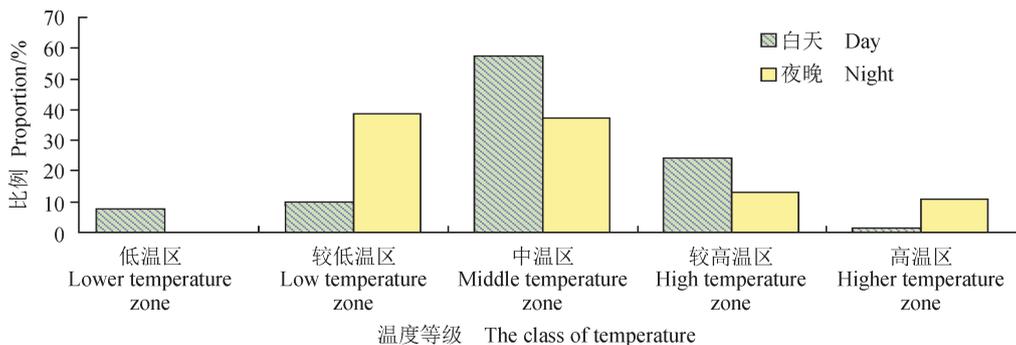


图 2 2001—2012 年青岛市昼、夜平均地表温度各等级所占比例图

Fig.2 The ratio of every land surface average temperature grade of daytime and night of Qingdao city in 2001—2012

统计结果表明, 青岛市夜晚高温区所占比例远高于白天, 分别为 10.85% 和 1.25%, 同时白天低温区所占比例为夜间的 36 倍。以上表现从正反两个方面表明夜间的城市热岛效应强于白天, 这与以往黄丽萍等 (2013)、傅娜等 (2014) 对天津市和上海市城市热岛日变化特征的研究结论一致。青岛市城市热岛表现出昼弱夜强的特征, 可能受青岛市所处自然环境的影响。常志清等 (2002) 对青岛地区海陆风的数值模拟研究表明, 青岛市环胶州湾地区以及东岸和南岸均存在海陆风, 且海风夏半年形成时间早 (大约出现在 9:00—11:00, 持续 7—11 h),

冬半年形成时间晚 (大约出现在 11:00—13:00, 持续 5—7 h), 这在一定程度上对青岛市白天的城市热岛起到了一定的缓解作用。

3.1.2 季节变化

本文将 3、4、5 月份作为春季, 6、7、8 月份作为夏季, 9、10、11 月份作为秋季、12、1、2 月份作为冬季, 通过对青岛市 2001—2012 年不同时相的地表温度数据按照季节划分标准进行求平均运算, 分别得到青岛市不同季节日平均 (图 3a)、白天平均 (图 3b) 和夜晚平均 (图 3c) 地表温度等级分布状况及各地表温度等级所占比例 (表 3)。

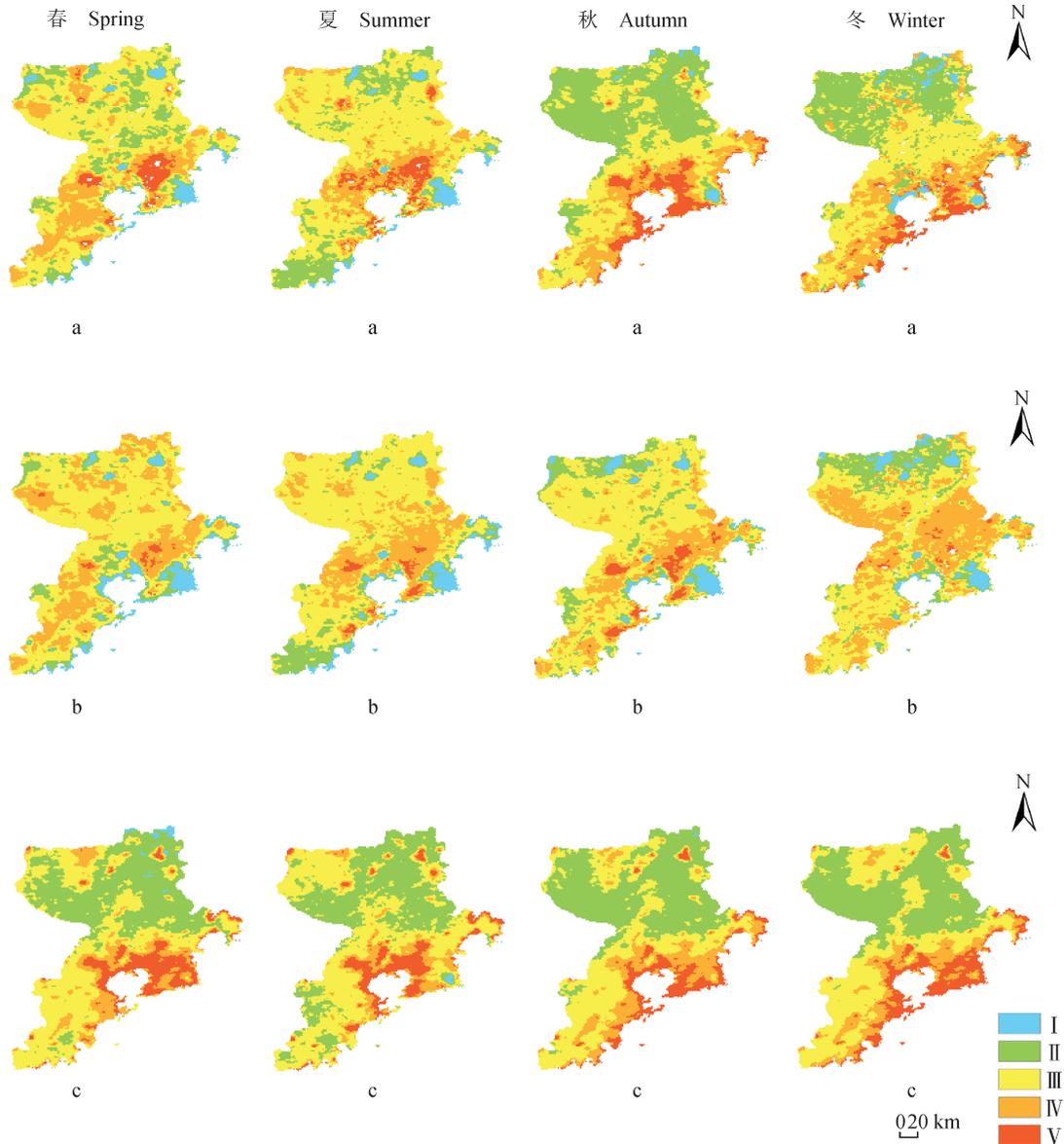


图 3 2001—2012 年青岛市地表温度等级季节分布状况

Fig.3 The seasonal distribution of surface temperature grade of Qingdao city in 2001—2012

由图 3a 可见,城市日平均地表温度等级分布形态在春、夏季比较分散,而秋、冬季分布较集中。其中秋、冬季的高温区面积相对较大,分别占青岛市总面积的 9.49% 和 8.66%,而春、夏季仅占 4.59% 和 5.7%。由于秋、冬季之间和春、夏季之间高温区比例相差不大,因此参考较高温区所占比重来确定各季节热岛强弱(表 3)。分析发现,冬季的较高温区所占比重高出秋季 1.68%,而夏季较高温区则低于春季的 6.14%,因此冬季热岛最强,夏季最弱。

图 3b 表明,各个季节白天的城市热岛分布较零散,且均存在一定差异。其间,夏、秋季的高

温区所占比重较大,分别占 3.64% 和 3.81%,春、冬季仅占 0.8% 和 0.67%。而参考较高温区分布情况,发现春、冬季所占比重远高于夏秋季,季节变化较明显。

各季节夜晚平均地表温度等级空间分布状况(图 3c)则表现出高温区分布相对白天更为集中的特点,各季节的高温区分布状况变化不大。夜晚高温区所占比例呈现出与白天完全相反的情况,即春、冬季所占比重较大,分别占 10.40% 和 9.66%,夏、秋季较小,分别占 9.3% 和 9.27%。而较高温区在四个季节相差不大,四季分布较稳定。

表 3 青岛市 2001—2012 年地表温度等级季节分布比例
Tab. 3 The ratio of distribution of the land surface temperature classof Qingdao in 2001—2012/%

等级 Class	年平均 Annual average				白天 Day				夜晚 Night			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
低温区 Lower temperature area	4.68	4.44	1.25	2.28	7.36	6.85	5.64	6.46	1.02	0.20	9.68	0.03
较低温区 Low temperature area	20.07	19.57	37.60	35.78	10.43	12.20	14.89	19.66	36.84	37.14	31.32	39.32
中温区 Middle temperature area	49.45	55.22	35.27	35.21	53.21	59.20	55.34	38.70	37.76	41.92	35.07	37.39
较高温区 High temperature area	21.21	15.07	16.39	18.07	28.20	18.11	20.32	34.51	13.98	11.44	14.66	13.60
高温区 Higher temperature area	4.59	5.70	9.49	8.66	0.80	3.64	3.81	0.67	10.40	9.30	9.27	9.66

综合上述分析, 青岛市城市热岛的季节变化特征总体表现为冬季最强, 夏季最弱; 且各季节白天热岛区分布变化较大, 夜晚则相对稳定。此结论与 Yassine and Sultan (2011)、黄丽萍 (2011) 和彭保发等 (2013) 对 Muscat 沿海地区、天津和上海地区的沿海城市热岛研究结论类似。而与内陆地区的相关研究则恰好相反, 如刘帅等 (2014)、Qiao and Tian (2014) 对北京城市热环境研究均发现夏季市中心形成热岛且强度与范围大, 冬季则变为冷岛。青岛市城市热岛的季节变化特征也在一定程度上证实了沿海与内陆地区城市热岛效应的季节变化差别以及海陆热力差异对沿海城市热岛效应的影响, 受其影响青岛市城市热岛效应不仅表现出昼弱夜强的日变化特征, 而且还表现出了夏弱冬强的季节变化特点。

同时, 笔者注意到本文的研究结论与陈志梅等 (2005)、董海鹰等 (2012) 利用多年气象观测数据对青岛地区城市热岛现象研究的结论类似, 与于臻等 (2015) 对青岛市城市热岛研究得到的夏、秋季强的结论有所不同。这很可能与于臻等的研究仅利用了 2011 年一年的 MODIS 数据, 而本文对青岛市城市热岛季节变化特征的分析是基于多年遥感数据, 更具有普遍意义。

3.1.3 城市热岛的年际变化特征

青岛市 2001—2012 年高温区所占比例呈上升

趋势 (图 4a), 平均以每年 15% 的速率增加, 表明青岛市的热岛区呈现出逐年增大的特点。这主要是由于随着近年来, 青岛市城市化水平的不断提高, 城市人口和能耗等的不断增加, 导致其城市热岛现象越来越显著。高温区比例与城市建成区面积的相关分析表明 (图 4b), 城市建成区面积与高温区比例呈正相关性, R^2 达到 0.6176, 进一步论证了城市化进程的加快导致城市热岛效应的加强。

3.2 城市热岛空间变化分析

3.2.1 城市热岛的空间分布

图 5 为青岛市年平均地表温度等级的昼夜分布状况与青岛市行政区划叠加图。总体来看, 白天青岛市各等级温度分布相对较分散, 而夜晚则比较集中。从昼夜各温度等级的空间分布来看, 白天高温区大部分集中在青岛市区, 部分高温区分布于即墨市南部、胶州市中部以及黄岛区东部, 其它地区则高温区分布较少。而夜间高温区面积较白天大, 体现出较强的城市热岛效应。其中, 青岛市区的大部分区域都为高温区, 即墨市南部、胶州市中部以及黄岛区东部也有高温区分布, 且莱西市北部和平度市东部少部分地区也出现了高温区。

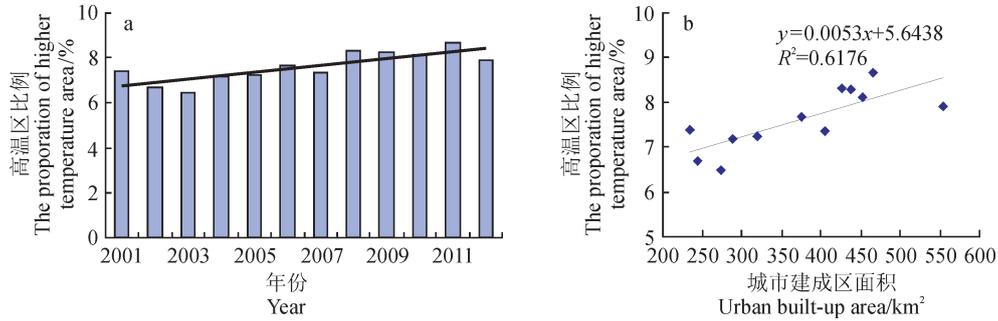


图 4 2001—2012 年青岛市高温区所占比例 (a) 及其与城市建成区面积的关系 (b)
 Fig.4 The proportion of higher temperature region and the relationship with urban built-up area of Qingdao in 2001—2012

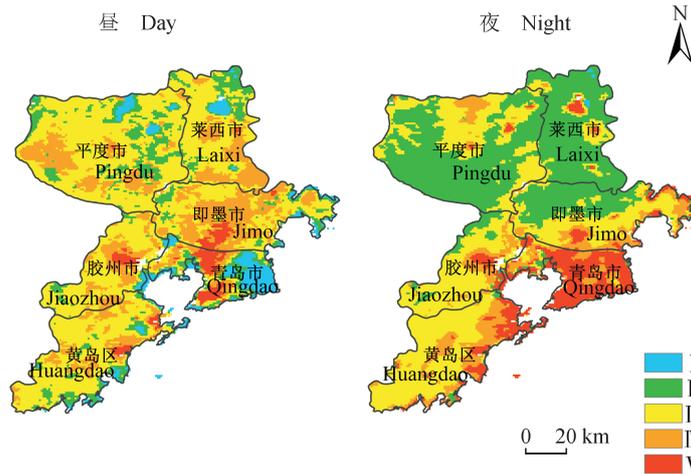


图 5 2001—2012 年青岛市年平均地表温度等级昼、夜分布与行政区划叠加图
 Fig.5 The distribution of land surface average temperature grade overlay with the administrative divisions of daytime and night of Qingdao city in 2001—2012

这种分布特点与青岛市的土地利用类型（图略）、地形特征（图 6）和海陆风分布呈现出较好的吻合性。由于不同的地物类型的物理特性差别较大，从而对地表温度产生不同的影响，因此土地利用类型也对城市热岛的分布产生重要作用。比如，高温区和较高温区主要分布在靠近城市中心的地区，与城市的发展关系密切，尤其是夜晚表现更为明显。另外，白天几处明显的低温区到了夜晚转变为高温区或较高温区，主要分布在海拔较低的环胶州湾地区和东、南部沿海地区（这些地区主要为鱼塘、茶园和果园等）以及海拔较高的地区，如东南部崂山地区和北部大沂山地区以及莱西市北部等，而其它大部分地区的地表温度等级一般白天高于夜晚，表明地形对地表温度

影响较大。此外常志清等（2002）对青岛地区海陆风的数值模拟研究发现青岛市环胶州湾地区以及东岸和南岸均存在海陆风，较好的对应了青岛市沿海地区地表温度等级的这种昼夜分布特点，表明海陆风在很大程度上影响城市热岛的分布。

3.2.2 城市热岛景观格局变化特征

图 7 是选取的各类型水平的景观格局指数的时间变化图，反映的是较高温区斑块和高温区斑块的变化特征。分析类型面积 (CA) 的变化情况，发现较高温区斑块面积总体呈下降趋势，高温区斑块面积总体呈现上升趋势，说明强热岛区面积逐渐增大，或者部分弱热岛区向强热岛区转化。从斑块个数 (NP) 方面来看，较高温区斑块个数呈现出波动上升趋势，而高温区斑块个数总体变

化相对较小, 线性趋势较平稳, 反映了该研究时间段内弱热岛区与强热岛区斑块的变化与转化趋势。较高温区的最大斑块指数 (LPI) 呈现出与 NP 完全相反的趋势, 但总体上为下降态势, 高温区的 LPI 则逐年上升, 反映了较高温区斑块越来越分散, 而高温区斑块则相对向更集中的趋势发展。形状斑块指数 (SHAPE_AM) 的变化情况与 LPI 非常相似, 说明较高温区斑块边界形状的复杂性逐渐减小, 高温区则逐渐增大。

图 8 是选取的景观水平的景观格局指数时间变化图, 反映了研究区各斑块总体的变化特征。从分析结果来看, 形状指数 (SHAPE_AM) 先减小后增大再减小, 但总体上呈现上升趋势, 反映了斑块形状的总体复杂程度总体上是增强的。香农多样性指数 (SHDI) 的变化相对较平缓, 总体趋势与 SHAPE_AM 相反, 呈下降趋势, 反映了伴随着城市化进程的推进, 温度景观斑块类型总体上是减少的。散布与并列指数 (IJI) 总体上逐年下降, 表明各类景观斑块的混合分布程度随着城市化进程的推进而逐渐减小, 分布越来越集中。蔓延度指数 (CONTAG) 反映了景观水平各类斑块之间的蔓延趋势, 某种优势斑块的连通性较好时, 其

蔓延度相对较高, 在研究时间范围内, CONTAG 的变化与 IJI 恰好相反, 呈逐年上升趋势, 说明总体上优势度比较高的中温区景观斑块的比重逐渐增大, 优势度升高, 这可能是由于部分低温区或较低温区斑块向中温区斑块转化的结果。

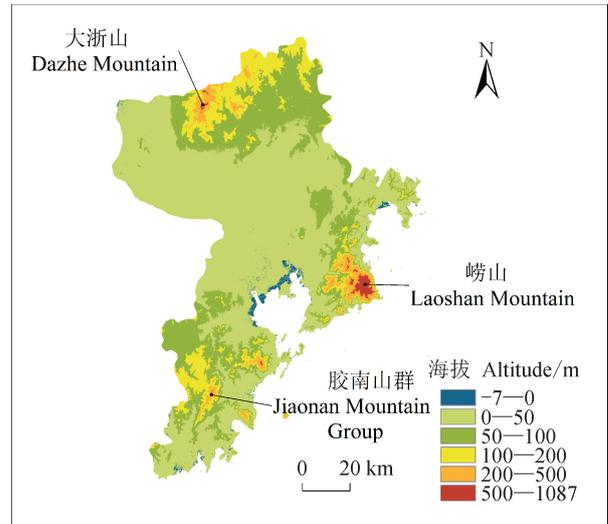


图 6 青岛市地形图
Fig.6 The topographic map of Qingdao city

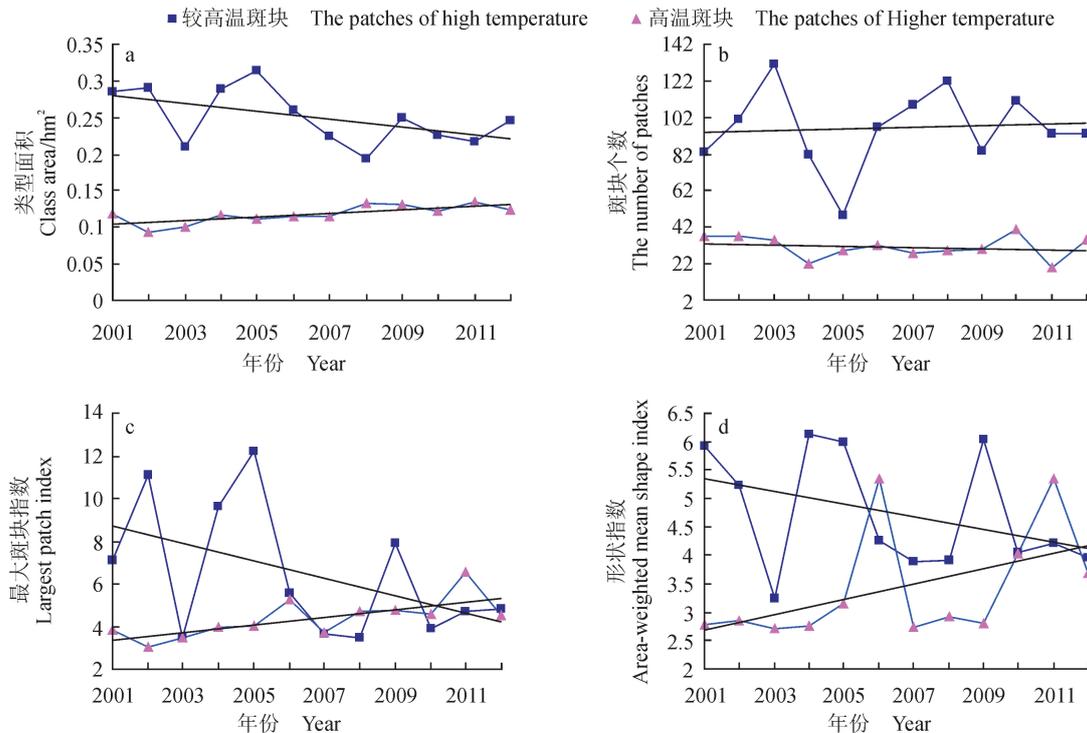


图 7 斑块类型水平景观指数变化
Fig.7 The change of class metrics on class level

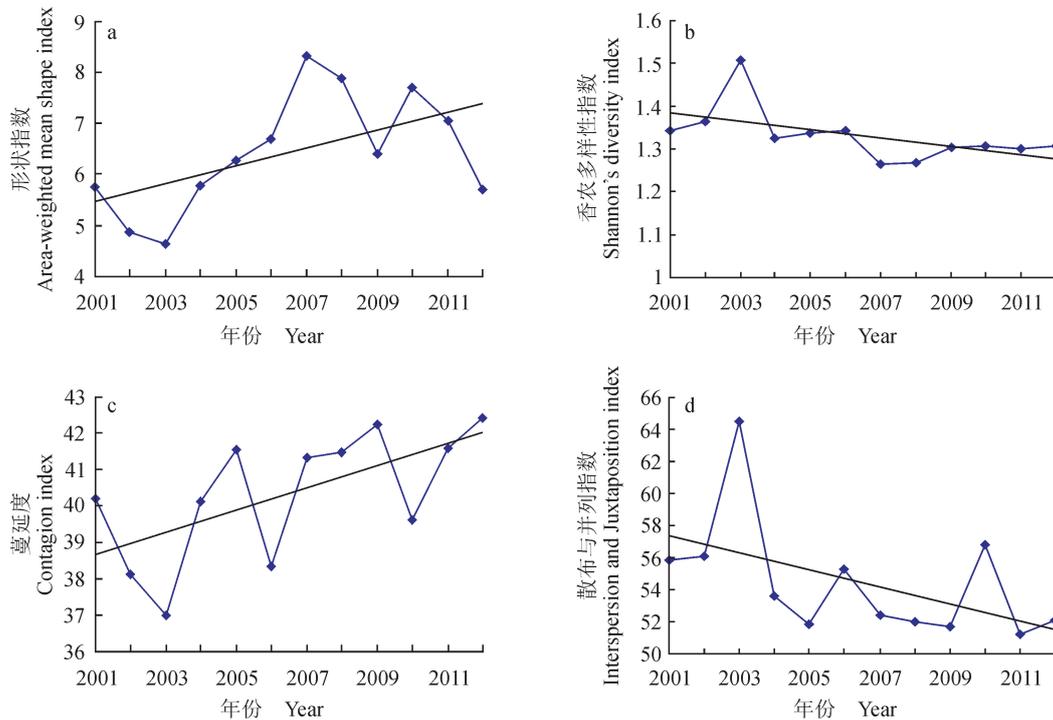


图 8 景观水平景观指数变化

Fig.8 The change of land metrics on landscape level

综上,通过对类型水平和景观水平的景观格局指数的分析,表明较高温区总体呈现逐渐减小与破碎化趋势,而高温区面积则逐年增大并向集中化趋势发展,青岛市的各城市温度斑块向集中化趋势演变。

4 结论

利用研究区域 416 幅连续、完整的 MODIS 地表温度产品数据,分析了青岛市城市热岛效应的时空变化特征,得到以下结论:

(1) 在时间变化特征上,城市热岛具有明显的日变化特征,表现出昼弱夜强的特点,热岛分布昼夜差异较大,白天热岛区分布较分散,夜晚则分布比较集中;城市热岛的季节变化明显,热岛强度总体表现为冬季最强,夏季最弱,且各季节白天热岛区分布变化较大,夜晚则相对稳定;城市热岛范围总体上呈现出逐年增大的特点,且城市建成区面积与城市热岛呈显著正相关关系。

(2) 在空间变化特征上,城市热岛主要集中在青岛市区、即墨市南部、胶州市中部以及黄岛区东部;并且白天几处明显的低温区到了夜晚转

变为高温区或较高温区,这种分布与变化特点在很大程度上受地形,海陆位置和土地利用类型等的影响;对城市热岛的景观格局分析反映了较高温区总体呈现逐渐减小与破碎化趋势,高温区面积则逐年增大并向集中化趋势发展,青岛市的各城市温度斑块向集中化趋势演变。

通过对青岛市城市热岛的时空特征研究,揭示了青岛市近十几年来城市热岛在不同时间尺度上的变化规律以及热岛的空间特征,这为缓解城市热岛效应、合理规划城市布局具有建设性的参考意义,同时也丰富了沿海城市的热岛效应理论,在一定程度上为后续研究奠定理论依据。

参考文献

- 陈利顶,刘洋,吕一河,等. 2008. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来 [J]. 生态学报, 28(11): 5521-5531. [Chen L D, Liu Y, Lü Y H, et al. 2008. Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(11): 5521-5531.]
- 陈云浩,李京,李晓兵. 2004. 城市空间热环境遥感分

- 析:格局、过程、模拟与影响[M].北京:科学出版社:85-95. [Chen Y H, Li J, Li X B. 2004. Remote sensing analysis of urban space thermal environment: pattern, process, simulation and influence [M]. Beijing: Science Press: 85-95.]
- 陈志梅,刘秦玉,沈小野,等. 2005. 青岛近百年气温变化特征[J]. *中国海洋大学学报*, 35(2): 189-194. [Chen Z M, Liu Q Y, Shen X Y, et al. 2005. The characteristics of temperature change in Qingdao [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 35(2): 189-194.]
- 常志清,吴增茂,高山红. 2002. 青岛海陆风三维结构的数值模拟[J]. *青岛海洋大学学报*, 32(6): 877-883. [Chang Z Q, Qu Z M, Gao S H. 2002. Numerical simulation three dimensional structure of sea and land breeze over Qingdao [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 32(6): 877-883.]
- 但尚铭,但 玻,蒋 薇. 2011. 成都市热力景观空间格局分析[J]. *四川环境*, 30(2): 53-56. [Dan S M, Dan B, Jiang W. 2011. Analysis of spatial patterns of thermal landscape in Chengdu [J]. *Sichuan Environment*, 30(2): 53-56.]
- 董海鹰,侯建伟,刘学忠,等. 2012. 青岛地区城市热岛效应研究[J]. *海洋科学进展*, 30(1): 17-23. [Dong H Y, Hou J W, Liu X Z, et al. 2012. Study on urban heat island effect in Qingdao area [J]. *Advances in Marine Science*, 30(1): 17-23.]
- 傅 娜,陈葆德,谭 燕,等. 2014. 上海自动站气温资料的空间质量控制与特征分析[J]. *大气科学学报*, 37(2): 199-207. [Fu N, Chen B D, Tan Y, et al. 2014. Spatial quality control and characteristic analysis of AWS temperature data in Shanghai [J]. *Transactions of Atmospheric Science*, 37(2): 199-207.]
- 黄聚聪,赵小峰,唐立娜,等. 2011. 城市热力景观格局季节变化特征分析及其应用[J]. *生态环境学报*, 20(2): 304-310. [Huang J C, Zhao X F, Tang L N, et al. 2011. Analysis on the seasonal changes of urban thermal landscape pattern and its application [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 20(2): 304-310.]
- 黄丽萍. 2011. 天津地区城市热岛效应研究[D]. 南京:南京信息工程大学. [Huang L P. 2011. Analysis of urban heat island in Tianjin [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology.]
- 黄丽萍,苗峻峰,刘月琨,等. 2013. 天津地区夏季海陆风对城市热岛日变化特征影响的观测分析[J]. *大气科学学报*, 36(4): 417-425. [Huang L P, Miao J F, Liu Y K, et al. 2013. Observational analysis of influence of sea-land breeze on diurnal characteristics of urban heat island in Tianjin during summer [J]. *Transactions of Atmospheric Science*, 36(4): 417-425.]
- 刘 帅,李 琦,朱亚杰. 2014. 基于HJ-1B的城市热岛季节变化研究——以北京为例[J]. *地理科学*, 34(1): 84-88. [Liu S, Li Q, Zhu Y J. 2014. Study on seasonal variation of urban heat island with HJ-1B satellite imagery: A case study of Beijing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34(1): 84-88.]
- 马安青,马冰然,张 震,等. 2015. 1990—2010年青岛地区热环境与土地利用变化的时空关系[J]. *水土保持通报*, 35(4): 182-188. [Ma A Q, Ma B R, Zhang Z, et al. 2015. Spatio temporal relationship between thermal environment and landuse change in Qingdao during 1990—2010 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 35(4): 182-188.]
- 苗峻峰. 2014. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展[J]. *大气科学学报*, 37(4): 521-528. [Miao J F. 2014. An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations [J]. *Transactions of Atmospheric Science*, 37(4): 521-528.]
- 彭保发,石忆邵,王贺封,等. 2013. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. *地理学报*, 68(11): 1461-1471. [Peng B F, Shi Y S, Wang H F, et al. 2013. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai [J]. *Acta Geographica Sinica*, 68(11): 1461-1471.]
- 王天星,陈松林,闫广建. 2009. 地表参数反演及城市热岛时空演变分析[J]. *地理科学*, 29(5): 697-701. [Wang T X, Chen S L, Yan G J. 2009. Estimation of land surface parameters and spatio-temporal characteristics of urban heat island [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 29(5): 697-702.]
- 徐 双,李飞雪,张卢奔,等. 2015. 长沙市热力景观空间格局演变分析[J]. *生态学报*, 35(11): 3743-3754. [Xu S, Li F X, Zhang L B, et al. 2015. Spatiotemporal

- changes of thermal environment landscape pattern in Changsha [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(11): 3743–3754.]
- 于 臻, 许君一, 刘佳传. 2015. 基于 MODIS 数据的青岛市城市热岛效应非一致性分析 [J]. *地理空间信息*, 13(2): 114–116. [Yu Z, Xu J Y, Liu C J. 2015. Non-consistency analysis of Qingdao urban heat island effect based on MODIS data [J]. *Geospatial Information*, 13(2): 114–116.]
- Arnfield A J. 2003. Two decades urban climate research: A review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island [J]. *International Journal of Climatology*, 23(1): 1–26.
- Zhang H, Qi Z F, Ye X Y, et al. 2013. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China [J]. *Applied Geography*, 44(4): 121–133.
- Howard L. 1833. *Climate of London deduced from meteorological observation* (3rd Ed) [M]. London: Harvey and Darton Press.
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359): 70–72.
- Qiao Z, Tian G J. 2014. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 715–734.
- Weng Q H. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications and trends [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 335–344.
- Yassine C, Sultan A Y. 2011. Integral assessment of air pollution dispersion regimes in the main industrialized and urban areas in Oman [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3): 625–634.