

杨鹏,陈静,侯晓玮,等. 2013. 基于多源数据的城市热岛效应研究——以石家庄地区为例. 气象, 39(10):1304-1313.

基于多源数据的城市热岛效应研究 ——以石家庄地区为例*

杨 鹏¹ 陈 静¹ 侯晓玮¹ 高 祺¹ 赵 强²

1 石家庄市气象局, 石家庄 050081

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031

提 要: 以石家庄地区为研究对象, 选取地面气象观测站数据、区域自动站数据、MODIS 1B 以及 Landsat7 ETM+ 卫星遥感影像数据作为主要数据源, 从气温和地表温度两个角度考虑, 分析城市化进程对城市热岛效应的影响, 城市热岛的时间变化规律以及空间分布规律等。研究结果表明: (1) 石家庄城市热岛强度随时间逐年增加且呈继续上升趋势, 与城市化进程呈同步变化趋势; (2) 采用同一时段气温和地表温度资料分别研究石家庄城市热岛空间分布特征, 发现夏、秋季白天和四季晚上石家庄城市热岛效应明显, 春、冬季白天有时出现“冷岛”效应; (3) 与白天相比, 在晚上气温和地表温度两者的相关性较好, 其相关系数可达 0.80; (4) 选用 Landsat7 ETM+ 高分辨率卫星遥感影像数据研究不同土地覆盖类型对城市热岛的影响, 发现地表温度随着植被指数 NDVI 的增大而减小, 两者之间呈现很好的负相关性, $R^2 = 0.72$ 。

关键词: 城市热岛, 城市化进程, 卫星遥感, 石家庄

中图分类号: P463

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.10.008

Study of Urban Heat Island Based on Multi-Source Data ——By the Example of the Shijiazhuang Area

YANG Peng¹ CHEN Jing¹ HOU Xiaowei¹ GAO Qi ZHAO Qiang²

1 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Abstract: The surface meteorological station data, regional automatic station data, MODIS 1B data and Landsat7 ETM+ satellite remote sensing data are used to study urban heat island in Shijiazhuang area. Temperature and land surface temperature data are used to study the impact of the urbanization on urban heat island, the temporal and spatial distribution of the urban heat island, etc. The result showed that: (1) The urban heat island in Shijiazhuang is increasing year by year, sharing the synchronous tendency with urbanization; (2) Temperature and land surface temperature data at the same time are used to study the spatial distribution of the urban heat island, which shows that the days of summer and autumn, and the nights of whole year have remarkable urban heat island (UHI) effect, but the cool island phenomenon sometimes appears in the spring day and the winter day; (3) The night temperature and land surface temperature (LST) were both correlated, the correlation coefficient is 0.80; (4) Landsat7 ETM+ data are used to study the effect of the different land cover categories on UHI, we found that NDVI and LST are negatively correlated. The smaller NDVI is, the higher LST is, and their negative correlation coefficient

* 国家自然科学基金项目(41005016)资助

2012 年 8 月 3 日收稿; 2013 年 1 月 7 日收修定稿

第一作者: 杨鹏, 主要从事遥感技术应用研究. Email: fga12345678@163.com

R^2 is 0.72.

Key words: urban heat island, urbanization, satellite remote sensing, Shijiazhang

引 言

城市热岛效应是指当城市发展达到一定规模时,由于城市人口密度的增加、城市下垫面的改变、大气污染以及人工废热的排放,使得城区温度高于郊区温度,形成类似高温孤岛的现象(郭红等,2007)。早在 19 世纪,人们就注意到城市发展以及人类活动所引发的城市热岛效应(王喜全等,2006)。城市热岛不仅容易使人高温中暑,使城市能耗增加,而且还会由于城市热岛的热力作用,形成所谓的城市热岛复合环流,造成从郊区吹向市区的局地风,把市区已扩散到郊区的污染大气又送回市区,加剧城市的大气污染。此外,城市热岛也使得大气中光化学反应加速,提高大气中有害气体的浓度,危害人体健康,严重的城市热岛效应甚至还会影响人们的日常生活和城市的可持续发展(季崇萍等,2006;张月维等,2006)。城市热岛效应已经成为城市气候中最普遍出现的典型现象之一(张恩浩等,2008),如何有效地缓解城市热岛已成为近年来研究的热点,分析研究城市热岛效应演变为城市的可持续发展提供一定的理论指导(杨英宝等,2009)。

19 世纪初,Lake Howard 首次提出城市热岛概念,指出伦敦城区气温高于郊区气温;Oke 将城市中心气温与郊区气温的差值定义为热岛强度;1972 年 Rao 首次利用热红外遥感数据研究城市热岛现象;Callo 等于 1993 年利用 NOAA 卫星遥感数据研究城市热岛对最低气温升高的影响(李兴荣等,2007;邓莲堂等,2001)。此后,各国学者对城市热岛的形成机理、变化特征、影响因素等开展了大量的研究工作,比如 Park(1986)发现热岛强度随风速的增大而减弱;Ackerman(1985)发现热岛强度随着云量的增加而减弱。目前,气温和地表温度都成为了研究城市热岛效应的有效手段,并且随着卫星遥感技术的发展,利用卫星遥感影像数据研究城市热岛成为当前的一大趋势,它可以大范围监测城市热岛的变化趋势以及空间分布特征,具有监测时相多,监测范围广,资料同步性好,数据易于分析等优点,但是存在时间分辨率低、受天气状况影响较大等缺点;利用地面气象观测站以及区域自动站等地面实测数据可以

弥补卫星遥感监测的不足,但地面观测存在空间分辨率低,空间代表性差等缺点,并且大面积的布设地面观测站或区域自动站需要耗费大量的人力、物力、财力,所以难以实施。地面观测数据与卫星遥感数据相结合可以发挥各自的优势,为研究城市热岛效应提供便利(徐军昶等,2006;王建凯等,2007)。

本文以地面气象观测站 1963—2002 年气温数据、区域自动站 2011 年气温数据、MODIS 1B 以及 Landsat7 ETM+ 卫星遥感影像数据作为本项研究所用数据源。利用地面气象观测站气温数据分析石家庄市城市热岛随时间的变化规律;从气温和地表温度两个角度出发,利用同一时次区域自动站气温数据和 MODIS 1B 反演得到的地表温度数据分析研究石家庄市城市热岛空间分布规律,并对气温和地温的相关性进行一定的研究与探讨;最后本文选用高分辨率卫星遥感影像数据 Landsat ETM+ 数据(2009 年 3 月 29 日)结合石家庄市土地覆盖类型对地表温度和植被指数两者之间的关系开展一定的研究。

1 资料和方法

1.1 气温数据

为了深入研究石家庄市城市热岛强度变化,本文选取石家庄市及周边共 5 个县(市)的地面气象观测站气温数据以及石家庄市 20 个区域自动站气温数据作为本项研究所用数据源。

本文所采用的地面气象观测站气温数据时间序列为 1963—2002 年,站点信息如表 1 所示。文中将石家庄城区周边 4 个县(市)的平均气温作为郊区气温(李兴荣等,2006),将城区气温与郊区气温的差值定义为城市热岛强度(UHI),由此分析石家庄市 1963—2002 年 40 年期间的热岛强度变化(施晓晖等,2001)。

$$T_{\text{郊区}} = (T_{\text{平山}} + T_{\text{藁城}} + T_{\text{元氏}} + T_{\text{赵县}}) / 4 \quad (1)$$

$$UHI = T_{\text{石家庄}} - T_{\text{郊区}} \quad (2)$$

区域自动站气温数据来源于石家庄市气象局,石家庄市气象局在石家庄全市范围内布设近二百多

表 1 石家庄周边 5 个县(市)地面
气象观测站点信息

Table 1 The information of ground meteorological
station of 5 counties (cities) around Shijiazhuang

站点	石家庄	平山	藁城	元氏	赵县
站号	53698	53694	53697	53791	53784
经度/°E	114.42	114.20	114.81	114.53	114.73
纬度/°N	38.03	38.25	38.01	37.75	37.76

个区域自动站站点,在全市范围内形成网格状布局。本文选用石家庄市范围内共计 20 个区域自动站(站点分布见图 1 所示)2011 年全年的气温资料进行统计分析,研究石家庄市城市热岛空间分布规律。区域自动站气温数据为分钟数据,为了研究气温场与地温场的相关性,本文所选用的区域自动站气温数据与 MODIS 1B 数据为同一时次。

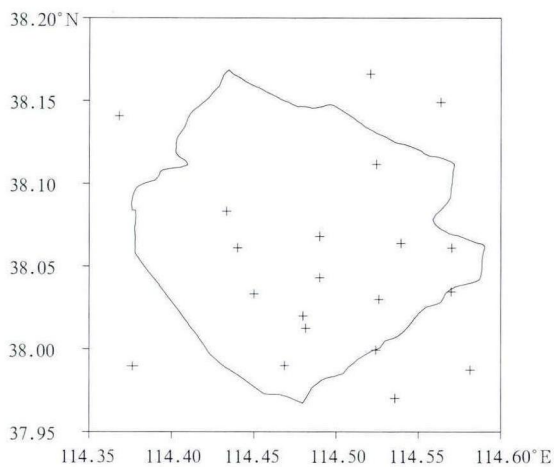


图 1 石家庄市区域自动站站点分布图

Fig. 1 Distribution of regional automatic station in Shijiazhuang

1.2 卫星遥感数据

1.2.1 MODIS 数据

MODIS 有 36 个离散光谱波段,涵盖了从 $0.4 \mu\text{m}$ (可见光)到 $14.4 \mu\text{m}$ (热红外)全光谱覆盖。MODIS 的最大空间分辨率可达 250 m,通道 1 和 2 空间分辨率为 250 m,通道 3~7 为 500 m,通道 8~36 为 1000 m。每条轨道的扫描幅宽达 2330 km,回归周期为 1~2 d。可对地球环境、海洋表面特性、大气中的云、辐射和气溶胶以及辐射平衡等进行综合观测,对开展自然灾害与生态环境监测、全球环境与气候变化等综合研究有很重要的意义(赵少华等,

2010)。

本文整理分析晴空无云条件下石家庄市 2011 年春季、夏、秋、冬四季白天、晚上的 MODIS 1B 数据(春:4 月 2 和 6 日;夏:7 月 7 日、8 月 8 日;秋:9 月 22 日;冬:2 月 1 日),采用第 31、第 32 热红外波段,选用劈窗算法反演石家庄市春、夏、秋、冬四季的白天、晚上地表温度空间分布图,分析石家庄市城市热岛空间分布规律。MODIS 1B 数据的处理步骤:(1)辐射定标、几何校正、边界图裁剪;(2)利用第 2、第 19 波段反演大气水汽含量,根据 MODTRAN 模拟大气水汽含量与大气透过率之间的线性拟合关系,估算第 31、第 32 波段的大气透过率 τ_{31} 、 τ_{32} ;(3)利用 MODIS 第 1、第 2 波段估算出第 31、第 32 波段的地表比辐射率 ϵ_{31} 、 ϵ_{32} ;(4)选用毛克彪等(2005)提出的劈窗算法进行地表温度的反演,得出石家庄市地表温度空间分布图,反演具体流程图见图 2 所示。

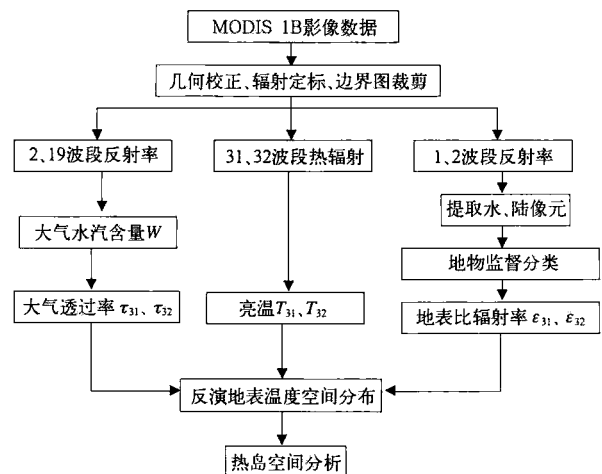


图 2 劈窗算法反演地表温度流程图

Fig. 2 The flow chart of LST retrieved by split window algorithm

1.2.2 Landsat7 ETM+ 数据

Landsat7 ETM+ (增强型主题成像仪)是在 Landsat4、5 卫星上的专题成像仪 TM 和 Landsat6 卫星上的增强专题成像仪 ETM 的基础上发展而来的(方圣辉等,2005)。Landsat7 ETM+ 影像数据包括 8 个波段(7 个多光谱和 1 个全色波段)(杨元建等,2011),band1~band5 和 band7 的空间分辨率为 30 m,band6 的空间分辨率为 60 m,band8 的空间分辨率为 15 m,南北的扫描范围大约为 170 km,东西

的扫描范围大约为 183 km,重复周期为 16 d。

本研究选用 2009 年 3 月 29 日 Landsat ETM+ 卫星遥感影像数据(图 3)作为研究所用数据源,利用热红外波段 band6 反演石家庄市地表温度空间分布图,利用 band3、band4 反演归一化植被指数 NDVI 分布图,分析研究不同土地覆盖类型(图 4 所示)对城市热岛效应的影响情况。本研究所用 Landsat7 ETM+ 数据来源于国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/index.jsp>),其中覆盖石家庄市卫星遥感影像图的条带号为 124,行编号为 34。

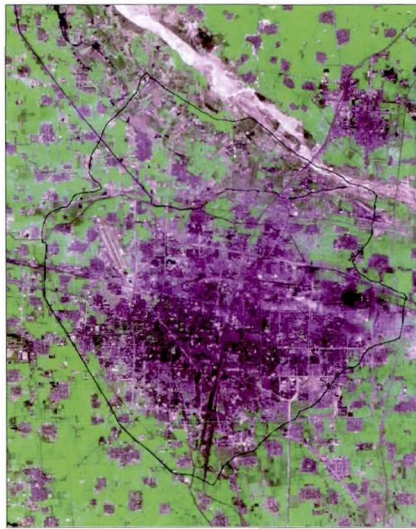


图 3 ETM+ 影像真彩色合成图
(波段 3, 4, 2)

Fig. 3 The true color composite
ETM+ image (bands 3, 4, 2)



图 4 石家庄市土地覆盖类型分布图

Fig. 4 The image of land cover categories

2 结果分析

2.1 热岛强度随时间变化特征

利用 1963—2002 年地面气象观测站气温资料分析石家庄城市热岛强度变化(图 5),选取石家庄市以及周边县(市)共 5 个地面气象观测站(平山、藁城、元氏、赵县、石家庄)的气温资料作为研究数据源,统计分析 1963—2002 年期间逐年的年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温的年季变化情况。从图 5a~5c 不难看出三者均呈逐步上升趋势,5 个地面气象观测站的气温变化走势基本保持一致,与气候整体变化情况相对应。利用本文定义的热岛强度公式计算石家庄市 1963—2002 年热岛强度随时间变化图(年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温),本文采用差值法可以基本消除气候因子对气温变化的影响。通过统计分析发现热岛强度逐年增加,并且以一定的速率在不断加剧。在 20 世纪 60 年代前期,石家庄市区的年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温较周边县(市)均偏高 0.5℃左右,1960 年代中期开始,年平均最低气温的城郊差明显高于年平均最高气温,表明城市热岛效应在夜间较白天强。年平均最低气温和年平均气温的城郊差在 1990 年附近出现一次明显增大,这与石家庄市城市规模超速发展,城市人口急剧增加存在一定联系,该结论可以有力地证实了石家庄市近年来城市化进程以及城区人口增长等诸多因素对城市热岛效应造成的影响,这一结论在北京以及其他城市得到大量的分析论证(司鹏等,2010)。图 5d 还可以看出,在 1980 年以前,年平均最低气温城郊差平均以每 10 年 0.26℃的速率上升,1990 年以后达到 1.7℃左右,说明夜间城市热岛强度明显加强;而年平均最高气温随年代际的变化不太明显,呈波动变化,城郊差异最大值仅为 0.5℃;年平均气温变化介于两者之间,平均以每 10 年 0.13℃速率增加,1990 年后达到 0.5~1.3℃。

2.2 热岛强度空间分布分析

为了研究石家庄市城市热岛空间分布规律,本文分别以石家庄市气温场和地温场作为研究出

发点,利用石家庄市范围内 20 个区域自动站的气温资料绘制石家庄市春、夏、秋、冬四季白天和晚上的气温空间分布图(图 6 和图 7),利用 TERRA/AQUA 上 MODIS 1B 卫星遥感影像资料反演得出石家庄市春、夏、秋、冬四季白天和晚上的地表温度空间分布图(图 8 和图 9)。所选用气温数据和 MODIS 1B 卫星遥感数据绘制城市热岛空间分布图可以基本反映石家庄市春、夏、秋、冬四季白天和晚上的空间分布特征,为了对比分析气温场与地温场的空间分布规律,本文所用的气温数据和地表温度数据选取条件要求为同一时次,这一选取原则也便于进一步分析研究气温和地表温度的相关性。

通过对比分析气温和地表温度空间分布图大致可以看出,夏、秋季白天和四季晚上均出现明显的城市热岛效应;冬、春季白天却出现冷岛效应,市区温度低于郊区。这可能是由于冬、春季市区城市污染物以及灰尘与郊区相比偏多并且不易扩散,削弱了太阳辐射,导致市区气温和地表温度较郊区明显偏低,在市区形成了“冷岛”效应。这一现象在北京城

区热岛效应研究中也有所体现,王建凯等(2007)用城乡地表热特性的差异来揭示冬季冷岛效应。目前,国内外很多研究都已证实城市冷岛效应的存在(Alexander et al,2006)。为了进一步证实冬、春季市区城市污染物以及灰尘对太阳辐射的削减作用,本文挑取 2010—2011 年空气质量分别为轻度污染、良(优)的日期进行简单的分析研究(图 10)。研究表明空气质量为良(优)的太阳辐射量整体高于空气质量为轻度污染的太阳辐射量,说明城市污染物以及灰尘对太阳辐射具有显著的削减作用。鉴于目前数据量的限制,此项工作并未开展深入研究,更严密的分析还需要以后进一步的探讨。

从图 6~图 9 还可以看出,夏季白天、冬季晚上城市热岛效应相对比较显著,并且在城区存在两个明显的热岛中心,具体位置分别位于火车站和东部工业区,与实际情况相吻合。沿着城中心两个峰值位置,在地表温度反演图中拉一条东西走向(X 轴)的剖面,绘制夏季白天和冬季晚上地表温度沿 X 轴剖面图(图 11),剖面位置大致位于纬线 38.05°N 上

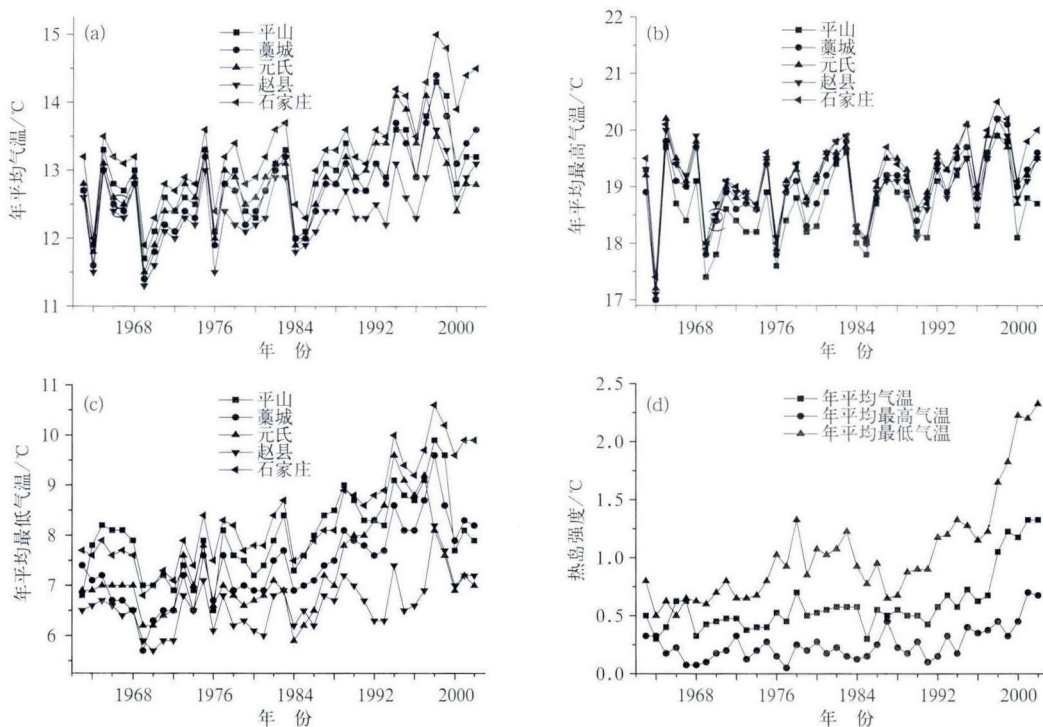


图 5 1963—2002 年石家庄、平山等 5 站的年平均气温(a)、年平均最高气温(b)、年平均最低气温(c)和同时段石家庄市热岛强度(d)变化图

Fig. 5 The annual mean temperature (a), average of maximum temperature (b), average of minimum temperature (c) of Shijiazhuang, Pingshan, etc., and variations of the urban heat island intensity in Shijiazhuang in the same time during 1963—2002

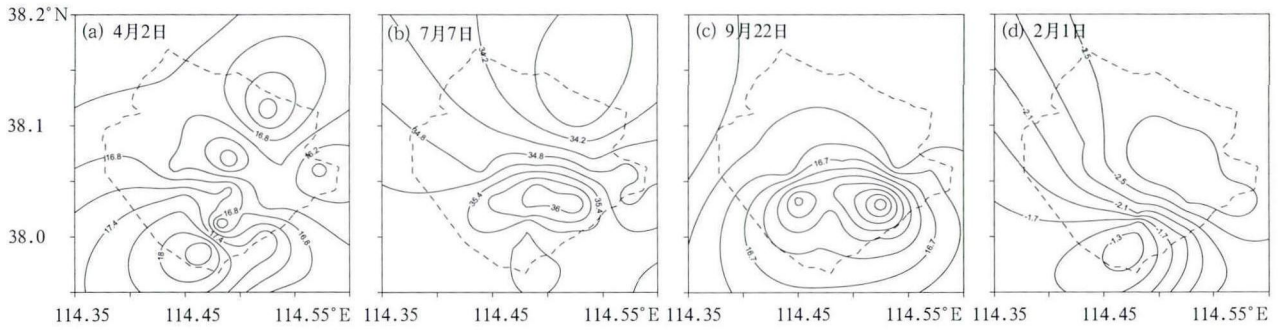


图 6 2011 年春、夏、秋、冬四季不同时次白天气温空间分布图

Fig. 6 The spatial distribution of spring, summer, autumn and winter based on temperature data in daytime in 2011

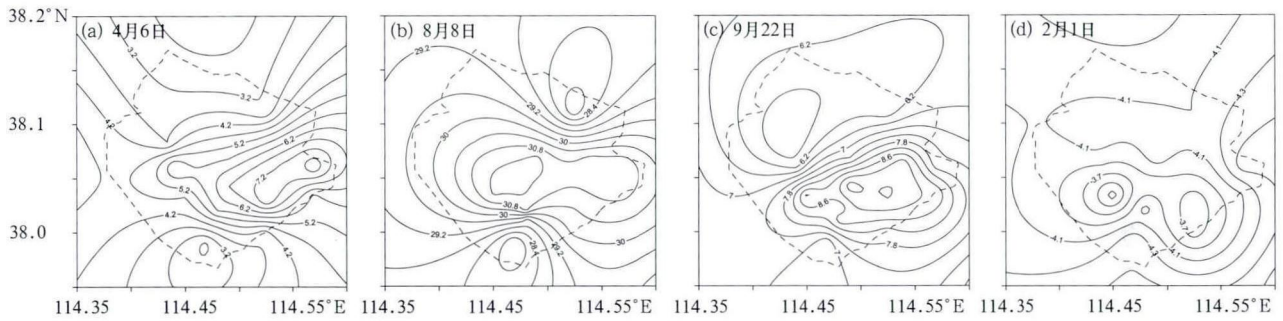


图 7 2011 年春、夏、秋、冬四季不同时次晚上气温空间分布图

Fig. 7 The spatial distribution of spring, summer, autumn and winter based on temperature data at night time in 2011

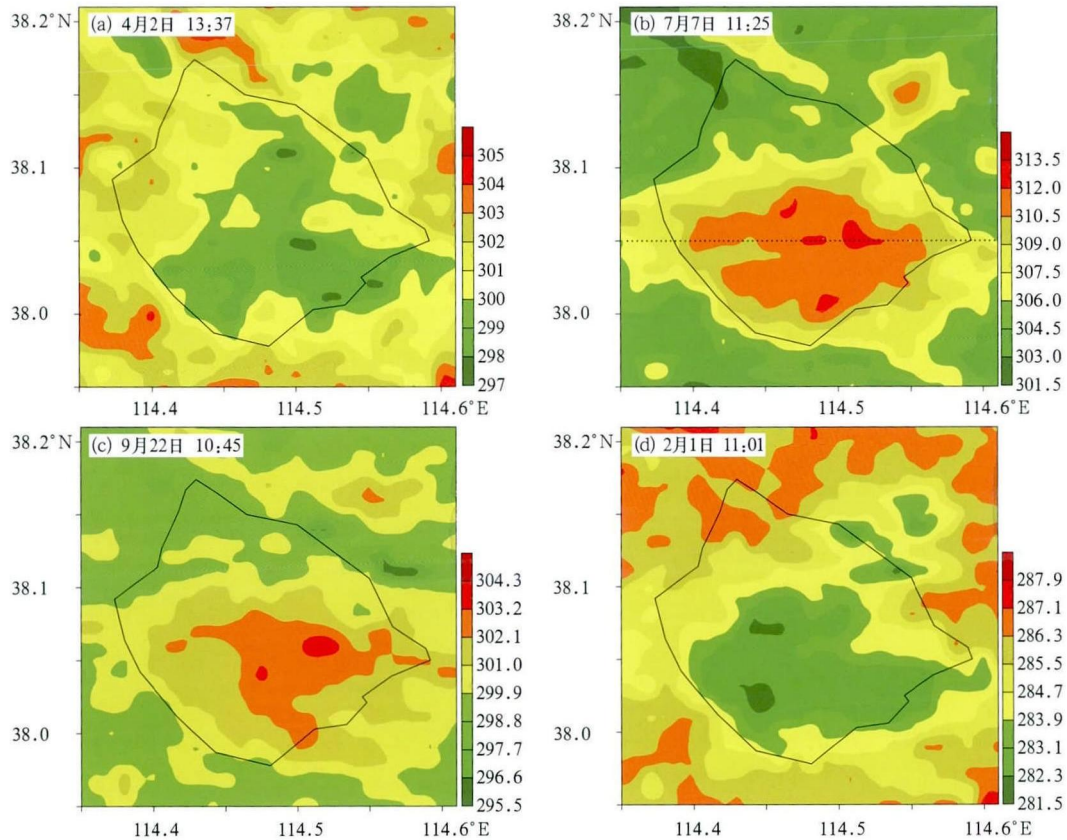


图 8 2011 年春、夏、秋、冬四季不同时次白天地表温度分布图

Fig. 8 The spatial distribution of spring, summer, autumn and winter based on LST in daytime in 2011

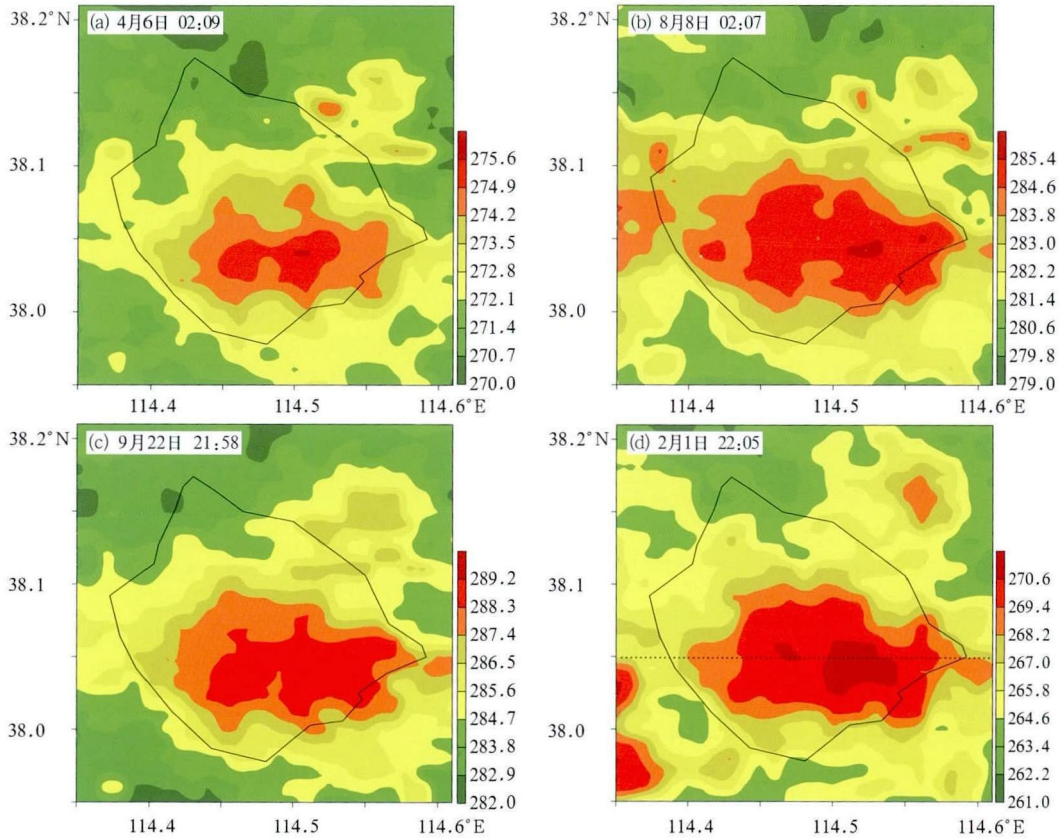


图 9 2011 年春、夏、秋、冬四季不同时段晚上地表温度分布图

Fig. 9 The spatial distribution of spring, summer, autumn and winter based on LST at night time in 2011

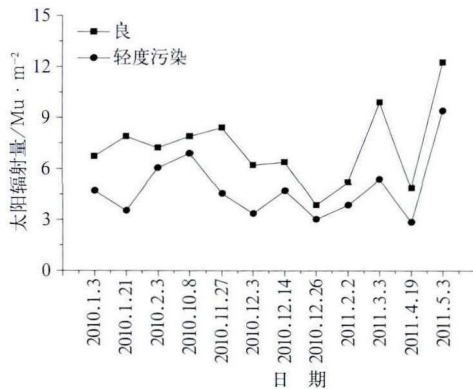


图 10 2010—2011 年空气质量对太阳辐射的影响

Fig. 10 The impact of air quality on solar radiation during 2010—2011

(如图 8b 和图 9d 所示)。从剖面分析图可以很清楚地看出城区温度比郊区偏高,且城区中心出现两个峰值,两个峰值在白天和晚上位于同一点。

为了进一步分析冬、春季冷岛的形成原因,王健凯等(2007)用城乡热特性的差异对其形成机理进行

研究,地表温度的日变化可以用式(3)近似模拟:

$$\delta T(t) = J(t) \cdot \frac{\sin[\omega t - \pi/4]}{\omega^{1/2} \cdot P} \quad (3)$$

式中, $\delta T(t) = T(t) - T_{min}$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60) \text{ s}^{-1}$, t 为时间(s), P 为热惯量, $J(t)$ 为地表短波净辐射。在模拟过程中取乡村和城市的短波净辐射相等的近似条件。乡村和城市的热惯量分别取 882 和 $1428 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 乡村的热惯量小于城市,可以得出在白天城市会出现冷岛效应。

同时本文还统计分析遥感数据所选日期相近的夏(2011 年 7 月 7 日前后几日逐时平均)、冬(2011 年 2 月 1 日前后几日逐时平均)两季区域自动站气温数据做逐时平均,并且进行热岛强度分析。研究发现,夏季与冬季夜间出现明显的热岛现象(图 12),冬季白天从 9—15 时出现一定的冷岛现象,与利用遥感影像数据反演结果以及式(3)模拟结果相一致。夏季白天热岛强度高于夏季夜晚,冬季晚上热岛强度高于冬季白天。

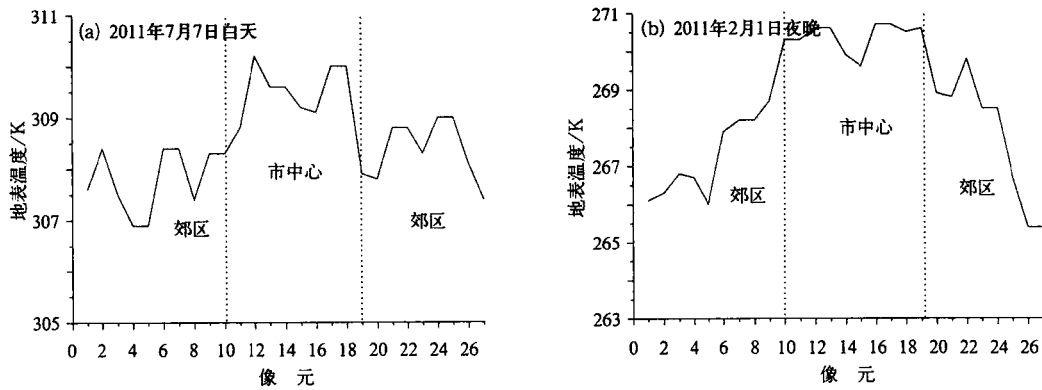


图 11 夏季白天(a)、冬季晚上(b)地表温度剖面分析图(X轴)

Fig. 11 The profile of the LST in summer days (a) and winter nights (b) (X axis)

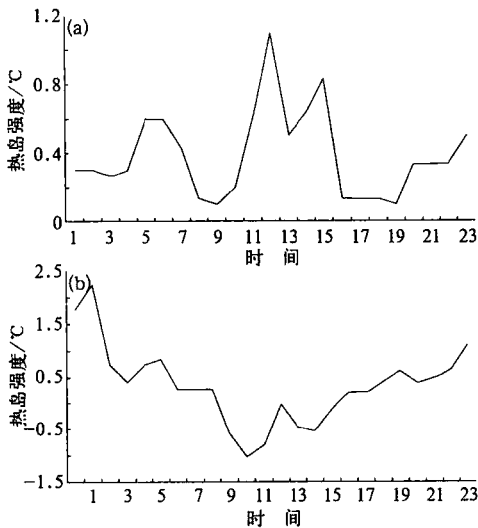


图 12 夏(a)、冬(b)两季热岛强度
随时间变化图

Fig. 12 The variation of the intensity of heat island in summer (a) and winter (b)

2.3 气温和地表温度相关性研究

对比分析图 6~图 9 发现,同一时次的气温(T_a)与地表温度(LST)在空间上基本保持一致,晚上气温与地表温度两者之间有很好的相关性,白天气温与地表温度相关性较差,晚上较白天吻合得明显较好。为了深入探索其内在原因,本文利用地面气象观测站实测数据统计分析气温和地表温度之间的关系,分别对白天、晚上的气温和地表温度进行分析,绘制两者之间的关系散点图(如图 13 和图 14 所示)。研究发现,白天气温与地表温度样本间差异明显,在低温区相关性较好,在高温区相关性较差;晚上气温与地表温度两者之间有良好的相关性,其相

关系数 $R^2 = 0.80$ 。该结论可以有效地解释本文中同一时次气温和地表温度在空间分布方面的差异,并且为以后分别利用气温和地表温度资料研究城市热岛效应提供一定的参考。

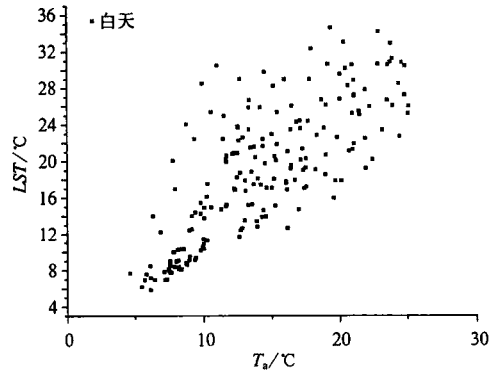


图 13 白天实测地表温度与气温的关系
Fig. 13 The correlation of LST and temperature in daytime

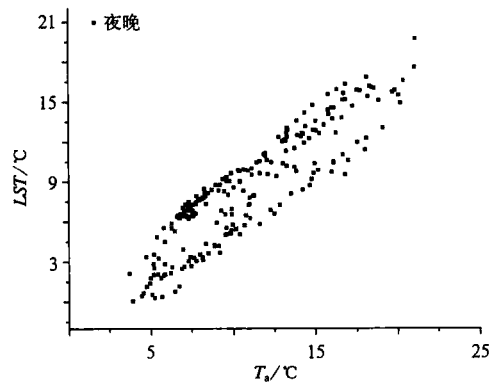


图 14 晚上实测地表温度与气温的关系
Fig. 14 The correlation of LST and temperature at night

3 不同土地覆盖类型对城市热岛的影响

与 MODIS 1B 的数据 1000 m 空间分辨率相比, Landsat7 ETM+ 数据空间分辨率(60 m) 高很多, 本文采用 Landsat7 ETM+ 遥感影像数据研究不同土地覆盖类型对城市热岛的影响更具有说服力。选取 2009 年 3 月 29 日 Landsat ETM+ 卫星遥感影像数据反演石家庄市植被指数以及地表温度空间分布图(图 15 和图 16), 分析研究不同土地覆盖类型对城市热岛效应的影响, 以 *NDVI* 为横坐标, *LST* 为纵坐标, 建立 *LST* 与 *NDVI* 之间的关系, 地表温度与植被指数 *NDVI* 之间的关系如图 17 所示。

对比图 15 和图 16 可以看出, 城区植被指数值 *NDVI* 较低, 相对应的地表温度值较高; 郊区反之。结合石家庄市土地覆盖类型可知, 城镇用地植被覆盖率低, 周边郊区植被覆盖率相对较高, 地表温度最大值出现在城镇用地。从图 17 可以更清晰看出地表温度随着植被指数 *NDVI* 的增大而减小, 这都说明了地表温度与植被指数有着很大的联系, 两者之间具有很好的负相关性, 且相关系数 $R^2 = 0.72$, 在某种程度上证实了植被指数低是导致城市热岛效应的原因之一, 城市绿地对缓解城市热岛效应效果显著, 周边大面积的绿化造林能够形成一定的生态小气候, 可以调节城区的生态气候。该结论对城市



图 15 植被指数图

Fig. 15 NDVI



图 16 地表温度图

Fig. 16 LST

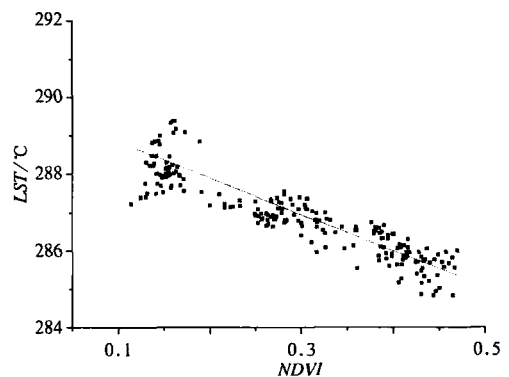


图 17 *LST* 与 *NDVI* 之间的关系

Fig. 17 The correlation of *LST* and *NDVI*

绿地规划和城市发展建设等具有一定的指导意义, 为下一步做好缓解城市热岛效应工作提供新思路。

4 结论

本文采用多种数据(地面气象观测站气温数据、区域自动站气温数据、MODIS 1B 卫星遥感影像数据以及 Landsat7 ETM+ 卫星遥感影像数据)作为数据源分析研究石家庄市城市热岛的空间分布规律以及热岛强度的时间变化规律, 并尝试从气温和地表温度两种角度分析城市热岛强度的差异性, 最后利用高分辨率卫星遥感数据 Landsat7 ETM+ 资料探讨不同土地覆盖类型对城市热岛的影响。研究结果可以归纳为以下几点结论:

(1) 随着石家庄城市化进程的推进以及城区人

口的不断增长,石家庄城市热岛强度随时间一直增加并且以一定的速率在不断加剧。

(2) 分析研究同一时次气温和地表温度空间分布发现,夏、秋季白天和四季晚上均存在明显的城市热岛现象,春、冬季白天城区温度有时低于郊区温度,呈冷岛效应,与石家庄目前实际情况相吻合。

(3) 夏季白天、冬季晚上热岛效应较为显著,并且在城区存在两个明显的热岛中心,分别位于火车站和东部工业区。

(4) 利用同一时次气温和地表温度研究城市热岛空间分布发现两者在晚上吻合较好,而在白天存在一定的差异,经研究发现气温和地表温度在晚上存在较高的相关性,在白天相关性较差,为今后利用不同数据源研究城市热岛效应提供一定的指导意见和参考价值。

(5) 选用 Landsat7 ETM+ 高分辨率卫星遥感影像数据研究不同土地覆盖类型对城市热岛的影响,发现地表温度随着植被指数 NDVI 的增大而减小,两者之间呈现很好的负相关性,有力地证实城市绿地对缓解城市热岛效应效果显著。

致谢:衷心感谢中国科学院安徽光机所遥感中心崔生成对本项研究提供的指导,衷心感谢南京信息工程大学教师王震对文章的修改提出指导性意见,感谢河北省科研所赵春雷提供的 MODIS 1B 卫星遥感影像数据。

参考文献

邓莲堂,束炯,李朝颐. 2001. 上海城市热岛的变化特征分析. 热带气象学报, 17(3): 273-280.

方圣辉,刘俊怡. 2005. 利用 Landsat 数据对武汉城市进行热岛效应分析. 测绘信息与工程, 30(2): 1-2.

郭红,龚文峰,李雁,等. 2007. 哈尔滨市热岛效应与植被的关系-基于 RS 和 GIS 的定量研究. 自然灾害学报, 16(2): 22-26.

季崇萍,刘伟东,轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. 地球物理学报, 49(1): 69-77.

李兴荣,胡非,舒文军. 2006. 近 15 年北京夏季城市热岛特征及其演变. 气象, 32(8): 42-46.

李兴荣,胡非,舒文军. 2007. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究. 气象, 33(6): 25-31.

毛克彪,覃志豪,施建成,等. 2005. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究. 武汉大学学报信息科学版, 30(8): 703-707.

施晓晖,顾本文. 2001. 昆明城市气候特征. 气象, 27(3): 38-41.

司鹏,李庆祥,李伟. 2010. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测. 气象, 36(2): 13-21.

王建凯,王开存,王普才. 2007. 基于 MODIS 地表温度产品的北京市热岛(冷岛)强度分析. 遥感学报, 11(3): 330-339.

王喜全,王自发,郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征. 气候与环境研究, 11(5): 627-636.

徐军昶,王勇. 2006. 基于卫星遥感的“城市热岛”分析. 气象, 32(6): 71-74.

杨英宝,江南. 2009. 近 50 a 南京市气温和热岛效应变化特征. 气象科学, 29(1): 88-91.

杨元建,石涛,荀尚培,等. 2011. 基于遥感资料研究合肥城市化对气温的影响. 气象, 37(11): 1423-1430.

张恩浩,张晶晶,赵昕奕,等. 2008. 深圳城市热岛研究. 自然灾害学报, 17(2): 19-24.

张月维,何全军,赵晓利,等. 2006. 2005 年 7 月珠三角地表温度场的遥感监测分析. 气象, 32(9): 23-27.

赵少华,邱国玉,秦其明,等. 2010. MODIS 数据反演地表温度的应用研究. 干旱区资源与环境, 24(3): 51-54.

Ackerman B. 1985. Temporal march of the Chicago heat island. J Climate Appl Meteo, 24: 547-554.

Alexander V-Z, Jorge E, Amos Winter. 2006. Urban heat island analysis for San Juan, Puerto Rico. Atmos Environ, 40: 1731-1741.

Park H-S. 1986. Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. Atmos Environ, 20: 1859-1866.