

潘涛, 杜国明, 张弛, 等. 基于 Landsat TM 的 2001~2015 年哈尔滨市地表温度变化特征分析[J]. 地理科学, 2016, 36(11): 1759-1766. [Pan Tao, Du Guoming, Zhang Chi et al. Variation of Land Surface Temperature of Harbin City Based Landsat TM Data in 2001-2015. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(11): 1759-1766.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.11.020

基于 Landsat TM 的 2001~2015 年哈尔滨市 地表温度变化特征分析

潘涛^{1,2}, 杜国明³, 张弛¹, 董金玮⁴, 李全峰⁵, 石福习⁶

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 俄克拉荷马大学微生物与植物学空间分析中心, 美国 俄克拉荷马州 73019; 5. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 湖北 武汉 430074; 6. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012)

摘要:以哈尔滨市为例, 基于 2001 年、2004 年、2008 年和 2015 年夏季 Landsat TM 5/OLI 8 遥感影像为基础数据源, 采用“单窗算法”遥感技术手段定量反演瞬时地表温度格局, 并深入分析温度特征, 分区差异和重心变化。研究表明: 2001~2015 年研究区温度增加 1.44℃, 平均温年增 0.10℃, 3 时段(2001~2004 年、2005~2008 年、2009~2015 年)年均温分别增加 0.08℃、0.09℃、0.12℃, 具有加速上升趋势; 最高温增加 2.74℃, 始终位于香坊区, 最低温基本恒定, 始终位于道里区; 2001~2015 年极高、高、极低温度分区面积增加 4.92 km²、104.07 km²、87.71 km², 年均增量均具有持续增加趋势, 中、低分区面积减少 110.61 km²、84.94 km², 具有波动降低趋势, 极高、高、中、低分区格局总体按照城区-城乡结合地区-乡村的水平梯度扩展; 地表温度重心向东偏南 70.58°方向移动 536.90 m, 其中 6 个市辖区迁移方向和距离差异明显, 表明地表能量移动方向和温度重新分布的活跃程度不同。总体来看, 研究区地表温度上升明显, 分区时空变化剧烈, 能量的轨迹移动过程具有折返特征。

关键词: 地表温度; 单窗算法; 能量迁移; 哈尔滨市

中图分类号: P951

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2016)11-1759-08

自 21 世纪以来, 中国经济高速增长和城市化进程不断加快, 促使以水泥、柏油为主的硬化路面和钢筋混凝土结构建筑物大幅增加, 引发城市功能、形态、环境面貌发生明显变化, 尤其是地表下垫面与冠层结构的急剧改变导致城市热岛对区域热辐射能量平衡的影响正受到广泛关注^[1,2]。城市热岛不仅影响居民的生产、生活, 还成为阻碍城市发展与人类生存质量提高的重要原因, 了解城市热岛的变化状况有助于提高人居环境, 改善区域气候, 促进城市的可持续发展^[3]。

作为城市热岛的典型表征, 地表温度已成为学者们通过自然学科去发现和解释城市化引发热环境的突破点, 是城市扩张引发气候变化的关键性因

素, 更是构成城市生态环境不可或缺的内容^[4]。全球尺度, 地表温度在大气下界与地表的物质与能量交换、局地洋流循环等领域扮演重要角色^[5]。局地范围, 地表温度升高对城市近地面生态环境格局、水电能源消耗、居民人身健康带来的影响日益剧烈^[6,7]。鉴于城市地表温度精确测量难度的艰巨性, 陆面模式的遥感反演以其容易获取的遥感数据、便捷的遥感算法、快速而有效地反映现存现象等特点成为研究地表温度格局与过程的重要手段^[8]。

目前, 多数遥感模拟城市温度变化的研究主要集中在深圳^[9]、上海^[10]、西安、兰州^[11]以及北京等地^[12], 对北方寒温带, 特别是东北地区关注较少, 尺度大多局限于建成区范围内, 对建成区及其边缘

收稿日期: 2015-11-10; **修订日期:** 2016-01-22

基金项目: 荒漠绿洲国家重点实验室项目(Y471163)、东北农业大学“学术骨干”项目(16XG07)资助。[Foundation: State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology (Y471163), “Academic Backbone” Project of Northeast Agricultural University(16XG07).]

作者简介: 潘涛(1987-), 男, 黑龙江绥化人, 博士研究生, 研究方向为城市资源环境遥感和生态系统模拟。E-mail: pantaohlj@163.com

通讯作者: 张弛, 研究员。E-mail: zc@rms.xjb.ac.cn

区同步变化情境下的分析鲜有见闻,其内容多以对温度变化的分析为主,对能量过程的揭示不足。东北地区气候四季分明,夏季地表温度热效应明显,以哈尔滨建成区及其边缘区为研究区域,基于2001~2015年4期夏季Landsat TM 5/OLI 8影像,利用“单窗算法”定量遥感反演地表温度格局,深入剖析温度动态特征,探讨地表能量的变化趋势和再分布的活跃程度。可为东北地区城市热岛的研究提供参考,同时对夏季极端高温事件的预警具有现实意义。

1 研究区概况

哈尔滨市位于中国东北地区,是黑龙江的省会,中国东北部的政治、经济、文化、交通中心,地理坐标125°42'30"E~130°10'27"E,44°04'14"N~46°40'43"N。土地总面积约为5.38×10⁴km²,其中市辖区面积1.02×10⁴km²。地域辽阔,东部多山区及丘陵,山势不高。属中温带大陆性季风气候,1月平均气温-19℃,7月平均气温23℃。年降水量569.15 mm左右,降水主要集中在每年的6~9月之间^[14],河流以松花江水系和牡丹江水系为主。研究范围包含松北区、道里区、道外区、南岗区、平房区、香坊区6个市辖区,这6个区已经包含建成区及周边城乡结合地区。区内常住人口453.25万人,实现国民生产总值2 666.7亿元^[13],2001~2015年建设用地面积增加259.05 km²,占区域的比例由35.65%上升到48.06%,增幅12.41%。

2 数据来源与分析方法

2.1 地表温度遥感反演

2.1.1 影像来源

在USGS官网(<http://glovis.usgs.gov/>)检索2001~2015年夏季的Landsat TM5/OLI8(Path 118, Row 28)影像,获得日期为2001年7月27日、2004年8月20日、2008年8月15日和2015年7月18日4景影像,这4 d地表温度格局明显,影像质量较好,以这4 d为中心前后2 d内天气状况均为晴天,无风,气温接近,有利于降低反演误差,增强温度的可比性。

2.1.2 地表温度定量遥感反演方法

在参照相关研究的基础上^[15],采用单窗算法对Landsat TM5的波段6进行地表温度陆面模拟,Landsat OLI 8有2个红外波段,即:波段10和波段

11,参照相关研究^[15],选取波段10进行反演,方程如下^[16]:

$$Ts = [a_\lambda(1 - C_\lambda - D_\lambda) + b_\lambda(1 - C_\lambda - D_\lambda) + C_\lambda + D_\lambda]T_\lambda + D_\lambda T_a / C_\lambda \quad (1)$$

$$C_\lambda = \tau_\lambda \varepsilon_\lambda; D_\lambda = (1 - \tau_\lambda)[1 + (1 - \varepsilon_\lambda)] \quad (2)$$

式中 λ 为波段名称, a_λ 与 b_λ 为回归系数,当温度变化范围为0~70℃时, $a_\lambda = -67.35535$, $b_\lambda = 0.458608$, C_λ 和 D_λ 是2个中间参数;未知参数为温度亮度 T_λ ,大气平均作用温度 T_a ,地表辐射率 ε ,大气透过率 τ 。

Landsat TM热辐射与灰度值之间的关系及亮度公式如下^[17]:

$$L_\lambda = gain \cdot DN + offset \quad (3)$$

$$T_\lambda = K_2 / \ln(1 + K_1 / L_{(\lambda)}) \quad (4)$$

式中, $gain$ 为增益值, $offset$ 为偏移量, DN 为landsat影像的灰度值; K_1 和 K_2 为常量,TM5中 $K_1 = 60.766 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$;TM8中 $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

在标准大气状态下大气平均作用温度(T_a)是地面附近气温(T_0)的线性函数,根据地表温度估计方程5和6求大气平均作用温度^[18]:

$$T'_a = 16.011 + 0.92621T_0 \quad (\text{夏季}) \quad (5)$$

$$T_a = T'_a + 273.15 \quad (6)$$

文中基于植被覆盖(P_v)模拟地表比辐射率 ε ,参数如下:改进型归一化水体指数MNDWI,波段反照率 ρ_λ ,植被覆盖指数NDVI,植被覆盖度 P_v ,地表比辐射率 ε ^[19]。

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR) \quad (7)$$

$$\rho_\lambda = L_\lambda \cdot d^2 \cdot \pi / ESUN_a \cdot \cos\theta_s \quad (8)$$

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r) \quad (9)$$

$$P_v = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (10)$$

$$\varepsilon = P_v \times R_v \times \varepsilon_v + (1 - P_v) \times R_m \times \varepsilon_m + d_z \quad (11)$$

式中, $Green$ 、 MIR 为影像的绿波段和中红外波段; π 、 $ESUN_a$ 为常数, L 为波段热辐射, d 为日地距离, θ 为天顶角的换算值; ρ_{nir} 、 ρ_r 为近红外和红外波段反照率; $NDVI_s$ 、 $NDVI_v$ 是裸土和植被的植被归一化指数; R_v 、 R_m 为植被和城镇的温度比率, d_z 为修正值。

大气透过滤(τ)的变化主要取决于大气水分含量的变化,水分含量估算参考文献[20],主要方程为如下:

$$\tau(w) = 0.982007 - 0.09611w, w \in (0.4, 1.6) \quad (12)$$

$$\tau(w) = 1.053710 - 0.14142w, w \in (1.6, 3.0) \quad (13)$$

验证数据采用研究区内对应时间的气象站点

卫星过境温度数据,基于 DEM 数字高程,矢量边界,Auspine 模型差值,采用 3×3 像元法,随机生成 70 个训练样本,进行相关性分析,得出 $R^2>0.75$ 且 $P<0.01$ (图 1)。

2.2 地表温度等级划分

结合相关研究^[21]和实际地温状况,采用温度等间距方法确定各个温度区间,划为极低温(< 28℃)、低温[28~31℃)、中温[31~33℃)、高温[33~36℃)、极高温($\geq 36^\circ\text{C}$) 5 个区。

2.3 地表温度重心模型

一定历史时期内温度重心迁移轨迹能直观、形象地反映出地表能量分布变化的历史过程,其迁移方向表明能量空间分布演化的方向和趋势,移动距离表示能量再分布的活跃程度,通过对温度重心移动轨迹的研究,能够揭示地表能量分布空间变化的特征和原因。地表温度重心的地理坐标通过方程 13 求出,对应的移动方向和移动距离通过方程 14 和 15 求出, R 为常数,取 111.111^[22]。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (14)$$

$$\theta_{i-j} = \frac{n\pi}{2} + \arctg\left(\frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}\right) \quad (15)$$

$$D_{i-j} = R \times \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2} \quad (16)$$

3 结果与分析

3.1 哈尔滨市地表温度总体特征分析

温度特征从最高温、最低温和平均温 3 个指标进行衡量(表 1)。全域最高温增加 2.74℃,年增 0.20℃,始终位于香坊区。最低温在 23.18℃左右微服浮动,始终位于道里区。平均温增加 1.44℃,年增 0.10℃,2001~2004 年,2005~2008 年,2009~2015 年 3 时段年均温分别增加 0.08℃、0.09℃、0.12℃,呈现加速上升趋势。这主要源于城乡居住区建设用地持续扩张,自然地表下垫面被人造地表代替,人造地表反照率小,热容量大,蒸发、蒸腾微弱,有利于太阳辐射存储所形成的增温效应。

根据“南拓”、“北越”、“中兴”、“强县”的城市空间发展战略,各区城市化进程不同,地表温度变化过程差异明显。最高温中香坊、南岗、道里、道外作为 2001 年以来涵盖建成区的市辖区,在 2001 年、2004 年、2008 年、2015 年的温度差值在 1℃以内,3 个时段温度增加趋势基本一致,作为兴起后才涵盖建成区的松北与平房二区,与其它区在 4 个时点的温度差值由 2.06℃逐步缩减至 0.95℃,温度具有加速增加特征。最低温中道里、道外、松北因

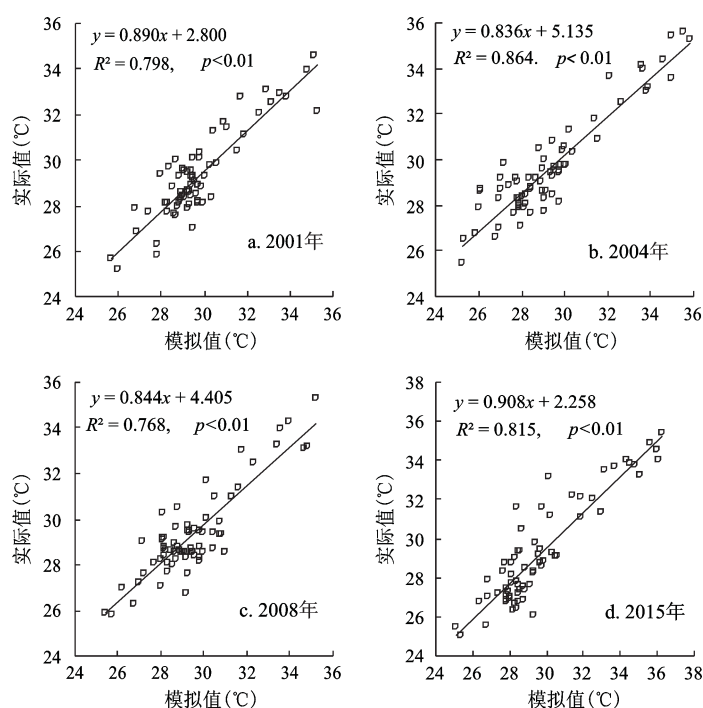


图1 地表温度实际值与模拟值拟合

Fig.1 Fitting of actual value and analog value in land surface temperature

表1 哈尔滨市地表温度总体特征(单位:℃)

Table 1 General characteristics of land surface temperature in Harbin (unit: °C)

指标	年份	全城	香坊区	南岗区	平房区	道外区	道里区	松北区
最高温	2001	39.15	39.15	38.61	37.41	38.96	38.87	37.09
	2004	39.49	39.49	38.81	38.27	39.25	39.15	37.74
	2008	40.06	40.06	39.83	39.52	39.87	39.77	38.68
	2015	41.89	41.89	41.86	41.34	41.64	41.74	40.94
最低温	2001	23.17	24.22	24.28	24.02	23.18	23.17	23.27
	2004	23.15	24.26	24.19	24.06	23.19	23.15	23.17
	2008	23.21	24.19	24.24	24.01	23.26	23.21	23.29
	2015	23.16	24.22	24.27	24.26	23.24	23.16	23.24
平均温	2001	28.34	28.59	28.65	28.56	28.67	28.76	27.83
	2004	28.58	28.74	28.89	28.80	28.88	29.00	27.92
	2008	28.93	29.31	29.67	29.23	29.29	29.45	28.15
	2015	29.78	30.60	30.73	30.42	30.23	30.31	29.11

有松花江河流穿过,4个时点温度基本在23.20℃附近,波动范围0.10℃,而香坊、南岗、平房4个时点温度基本在24.15℃附近,波动范围0.15℃。平均温在各区的每个时段均具有不断增加趋势,南岗作为哈尔滨的重点商业区,人口密集,基础设施完善,建筑物密度较大,地表热传导强,2000~2015年平均温增加2.08℃。香坊作为重点发展区和南岗区与平房区的过渡地带,建设用地扩张剧烈,增温2.01℃。松北虽然是哈尔滨城市发展的“北越”区域,建设用地扩张较大,但其辖区范围较大,整体增温幅度并不明显,增温1.28℃。道外与道里建设用地扩张相对较小,增温1.55℃左右。

3.2 哈尔滨市地表温度时空特征分析

图2表示地表温度地理空间信息,极高温区在城市内部填充式格局增多,高温区、中温区以城市为核心向外围不断增加,除极低温区基本分布于河流附近,极高温、高温、中温、低温总体按照城区-城乡结合地区-乡村的水平梯度扩展。从温度分区时间特征看,2001年极低温区面积28.10 km²,占全城的1.35%,集中分布于道里、道外、松北三区交界的松花江流域。低温区1 583.15 km²,占76.12%,是该地域分布最广的温度分区,呈现集中连片分布格局。中温区为372.25 km²,占17.91%,具有“点”“星”分布情形。高温区91.99 km²,占4.42%,集中于建成区及其周边城乡结合地区、平房区中北部、同时在河流西侧沿河两岸的裸土地带有少量零散分布。极高温区4.00 km²,占比仅为0.19%,集中于建成区中南和中北部。

到2015年极低温区增加87.71 km²,占比增幅4.41%,3时段具有不断上升趋势,这源于松花江流域哈尔滨段经过一系列水利工程使得河道面积大幅拓宽,其附近的支流、湖、泡、湿地沼泽区域增多(道外区北部更为明显),加之道里区中部“立功水库”的修建和香坊区东南部林地种植。低温区减少84.94 km²,降幅4.12%,源于耕地资源用途非农化。中温区减少110.61 km²,降幅5.33%,源于松北区中北与西南部,道里区中部低植被覆盖地区开垦为耕地,植被覆盖增加,地表温度降低,进入低温区。高温区增加104.07 km²,增幅5.00%,3时段具有持续增加特征,分布范围由城区向外部扩张,源于城市化快速发展导致硬化路面与钢筋混凝土建筑物密度增多,温度提升,同时松花江西侧沿河两岸裸土高温范围由于河道拓宽和植被覆盖增多导致面积减少。极高温区增加4.92 km²,增幅0.24%,在城区中北和中南部居多,源于集中连片的道路、广场等所形成的高度聚温显热效应。

3.3 哈尔滨市地表温度重心变化特征分析

城市规模和工业用地的不断扩张,加之人口的快速增长,导致基础设施成摊大饼式发展,使得城区向外缘扩展幅度较大。总体呈现出南拓至平房区中部,北越过松花江流域,西展至道外区中部,东推至道里区中东部的格局,城区内部旧城区不断改造、新建筑群不断兴起,地表温度随建设用地扩张不断上升,重心不断变化(图3)。其中,2001~2004年以建设道外区和香坊区为主,重心向

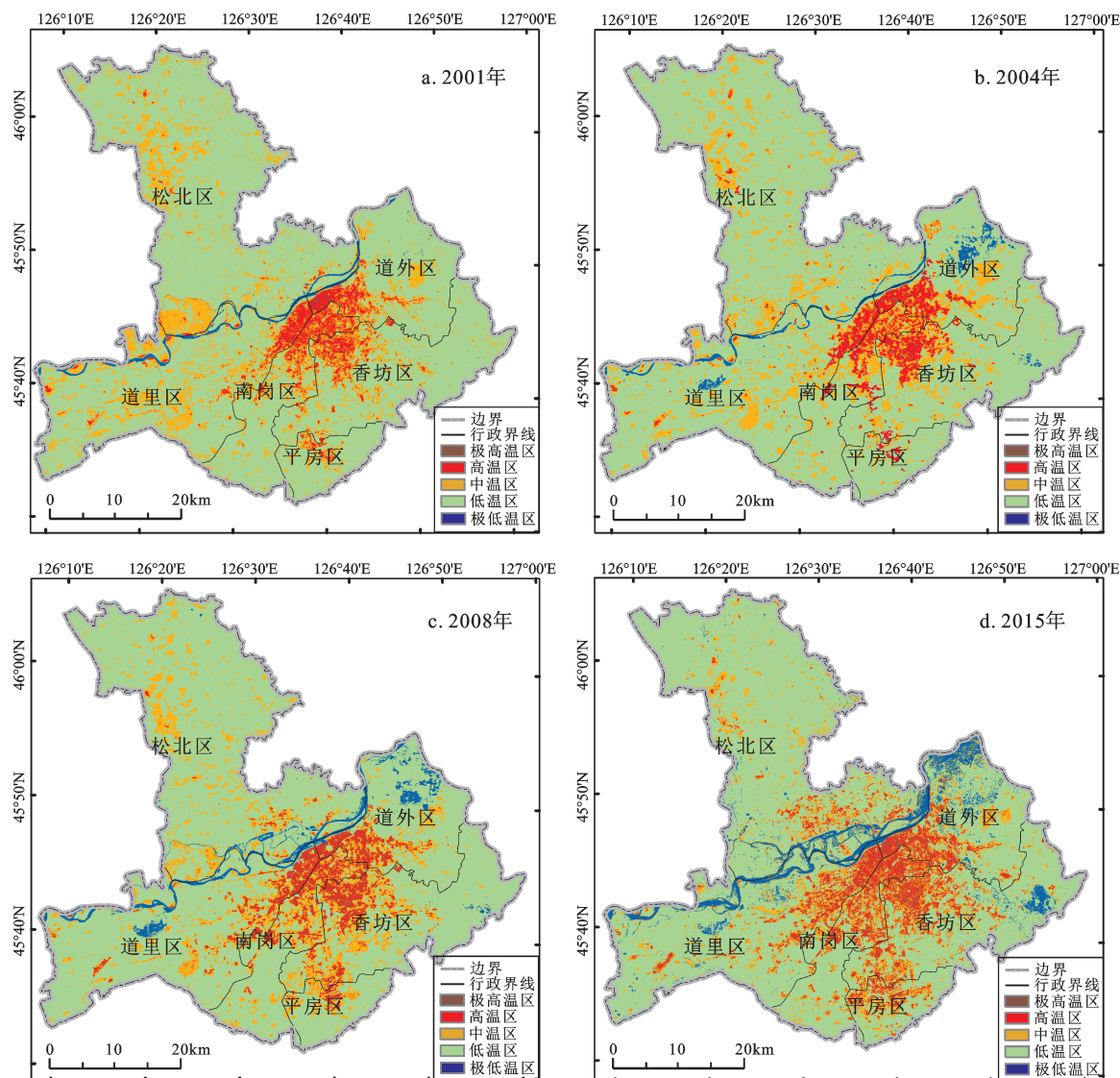


图2 哈尔滨市地表温度时空分布

Fig.2 Distribution of land surface temperature in Harbin

东南方向移动,2005~2008年以城区南拓至平房区为主,重心向西南方向移动,2009~2015年以完善平房区、新建松北区、改造旧城区为主,重心向东北方向移动。因此,地表温度重心向东偏南 70.58° 方向移动536.90 m,表明地表能量的空间变化趋势向东南迁移。

各区域地表温度重心迁移差异明显。道里区建设用地扩张集中在中北部,温度重心向东偏北 14.07° 方向移动1 364.32 m,具有方向小、距离长的特点。道外区发展向中部和北部延伸,重心向东偏北 110.74° 方向移动518.27 m。松北区发展主要集中在松花江北岸、辖区南部,原有的乡村聚落已经被城市建筑群代替,推动温度重心向南

移动。中部和西南部的荒地耕地取代,温度降低,推动重心向东移动,因而,温度重心向东偏南 49.50° 方向移动2 927.33 m。南岗区逐步向西南拓展,重心向东偏南 120.63° 方向移动848.87 m。香坊区除本身城区向南发展推动重心南移外,更多的受到城市发展战略的影响,其西部作为哈尔滨市“南拓”的必经区域,城市化速度较快,地表温度升温剧烈,推动重心向西移动,因此,重心向东偏南 141.81° 方向移动1 059.62 m。平房区向中部和西部发展,推动重心向东偏南 161.28° 方向移动539.06 m。各区重心迁移方向差异表明地表能量迁移趋势不同,迁移距离越长表明地表能量再分布的活跃程度越高。

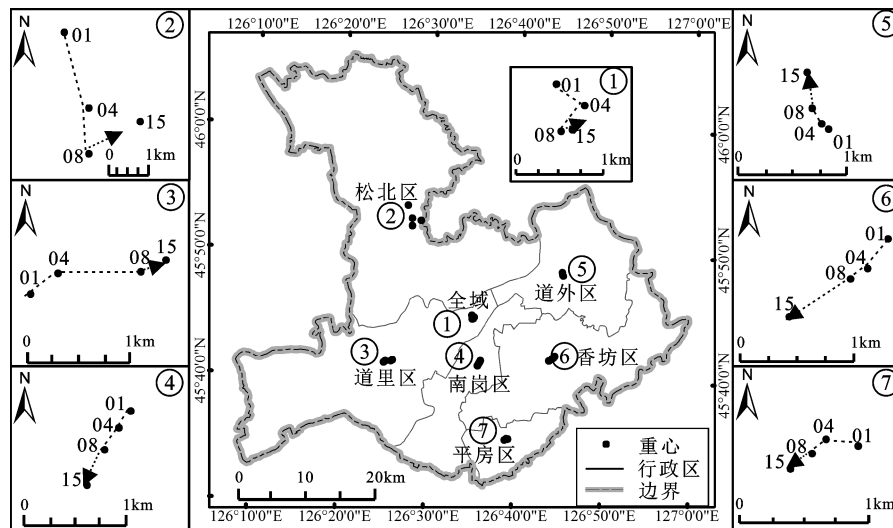


图3 哈尔滨地表温度重心变化

Fig.3 Spatial variation information of gravity center of land surface temperature in Harbin

4 讨论

本文发现该地区地表能量重心经历了先大幅向南后小幅向北折返的变化轨迹,随着松北新区开发力度加大,地表能量重心具有进一步向北移动趋势,地表热环境会持续发生变化,并影响大气和水循环过程,该区域地表热环境变化对城市气候、生态环境的影响将成为后续研究的焦点;另外,由于Landsat TM影像数据源限制,文中研究时点局限于4期,未能充分阐释2001~2015年地表温度的变化规律,而气象数据在时间尺度上具有长序列、连续性的特点,但站点布网稀疏^[23]。而基于Landsat TM影像、土地利用数据、气象数据,综合考虑植被覆盖指数、土地覆盖类型、降水、风速、气温等影响因子,构建基于Landsat TM反演温度与气象数据的拟合推算模型,可为开展逐年连续的、量化的地表温度变化规律的研究提供新的途径。

5 结论

采用单窗算法开展东北寒温带快速城市化地区地表温度变化特征研究,研究结论如下:

1) 2001~2015年增温1.44℃,平均温年增0.10℃,3时段分增0.08℃、0.09℃、0.12℃,具有加速上升趋势。各市辖区平均温年均值在4个时点均增加,其中,道外、道里、松北年均增量在0.09~0.11℃,而香坊、南岗、平房在0.13~0.15℃。

2) 极高温区、高温区、极低温区面积分别增

加4.92 km²、104.07 km²、87.71 km²,年均增量均具有持续增加趋势(极高温区2008年除外),中温区和低温区则减少110.61 km²、84.94 km²,年均变量具有波动降低趋势,除极低温区基本分布于河流附近,极高温、高温、中温、低温温度分区按照城区-城乡结合地区-乡村的水平梯度逐渐扩展。

3) 全域温度重心轨迹向东南(2001~2004年)、西南(2005~2008年)、东北(2009~2015年)方向移动,总体向东偏南70.58°方向移动536.90 m,地表能量具有向东南迁移趋势。各市辖区重心距离变化松北区、道里区、香坊区在1 000 m以上,温度再分布更为活跃,其它区在500~1 000 m之间。重心方向变化道里区、道外区为东偏北,而松北区、南岗区、香坊区、平房区为东偏南°,在能量重心变化的距离和方向上,适当增加植被种植,可提升人居环境。

参考文献(References):

- [1] Bingcheng L. Problems of municipal ecological environment and the sustainable development in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 1-6.
- [2] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631. [Huang Jucong, Zhao Xiaofeng, Tang Lina et al. Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: A case study of Xiamen City. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 622-631.]
- [3] Oke T R. Boundary layer climate [M]. Cambridge: Great Brit-

- ain at the University Press, 1987: 1-3.
- [4] Hafner J, Kidder S Q. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 448-465.
 - [5] 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 等. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究——以北京为例[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 252-261. [Luan Qingzu, Ye Caihua, Liu Yonghong et al. Effect of urban green land on thermal environment of surroundings based on remote sensing: A case study in Beijing, China. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(2): 252-261.]
 - [6] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science (New York, N.Y.)*, 2008, 319(5864): 756-760.
 - [7] Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2592-2605.
 - [8] Weng Q, Lu D, 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.
 - [9] 宋艳娥, 余世孝, 李楠, 等. 深圳特区表面温度空间分异特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1489-1498. [Song Yantun, Yu Shixiao, Li Nan et al. Spatial structure of the surface temperature in Shenzhen, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1489-1498.]
 - [10] 王敏, 孟浩, 白杨, 等. 上海市土地利用空间格局与地表温度关系研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 343-350. [Wang Min, Meng Hao, Bai Yang et al. Relationships between landscapes spatial pattern and land surface temperature in Shanghai. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, 22(2): 343-350.]
 - [11] 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. [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. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1530-1537.]
 - [12] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77. [Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77.]
 - [13] 哈尔滨市统计局. 2014 年哈尔滨市国民经济和社会发展统计公报[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. [Harbin municipal bureau of statistics. *Economic and Social Development Statistical Communique in 2014 of Harbin*. Beijing: China Statistics Press, 2015.]
 - [14] 宋戈, 高楠. 基于 DEA 方法的城市土地利用经济效益分析——以哈尔滨市为例[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 185-188. [Song Ge, Gao Nan. Economic benefit analysis of urban land utilization based on DEA method: A case of harbin city. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(2): 185-188.]
 - [15] Qin Zh, Zhang M, Karnieli A et al. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.
 - [16] 周义, 覃志豪, 包刚. 热红外遥感图像中云覆盖像元地表温度估算初论[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 329-334. [Zhou Yi, Qin Zhihao, Bao Gang. A preliminary view on the estimation of land surface temperature under cloud cover from thermal remote sensing data. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 329-334.]
 - [17] Rozenstein O, Qin Zhihao, Derimian Y et al. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2014, 14(4): 5768-5780.
 - [18] 覃志豪. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 456-466. [Qin Zhihao. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.]
 - [19] Qin Zh, Li W, Zhang M et al. Method for estimating the principal atmospheric parameters of mono-window algorithm[J]. *Remote Sensing for Land and Resource*, 2003, 56(2): 37-43.
 - [20] Kuang Wenhui, Dou Yinyin, Zhang Chi et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement[J]. *Journal of Geophysical Research-at-Mospheres*, 2015, 120(1): 113-130.
 - [21] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat8 数据地表温度反演算法对比[J]. *遥感学报*, 2015, (3): 451-464. [Song Ting, Duan Zheng, Liu Junzhi et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 2015(3): 451-464.]
 - [22] 王彬, 王宜强. 改革开放以来福建省经济重心格局演变及其空间差异[J]. *地理研究*, 2011, 30(10): 1882-1890. [Wang Bin, Wang Yiqiang. The development of economic gravity center and spatial difference of economy in Fujian from 1989 to 2008. *Geographical Research*, 2011, 30(10): 1882-1890.]
 - [23] 黄娉婷, 张晓平. 大都市区工业重心时空变动轨迹分析: 以天津市为例[J]. *经济地理*, 2012, 32(3): 89-95. [Huang Pingting, Zhang Xiaoping. Analysis of temporal and spatial movement of the gravity center of city industry: A case study of Tianjin. *Economic Geography*, 2012, 32(3): 89-95.]

Variation of Land Surface Temperature of Harbin City Based Landsat TM Data in 2001-2015

Pan Tao^{1,2}, Du Guoming³, Zhang Chi¹, Dong Jinwei⁴, Li Quanfeng⁵, Shi Fuxi⁶

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, 830011 Xinjiang, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 4.Departments of Microbiology and Plant Botany, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma 73019 USA; 5. School of Public Administration, China University of Geosciences, Hubei, Wuhan 430074, China; 6.Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, Jilin, China)

Abstract: As a rapid urbanization region in Northeast China, Harbin City has experienced dramatic urban expansion in recent decades, followed by increased urban heat island (UHI) effects. In order to explore the UHI effects under such a rapid urbanization process, the mono-window algorithm and Landsat images was used to retrieve land surface temperature (LST) in Harbin City in summer of 2001, 2004, 2008, and 2015. We then analyzed general characteristics and regional discrepancies of urban heat effects as well as the trajectory of urban heat gravity center in the period. The results showed that: 1) the highest LST occurred in Xiangfang District and increased by 2.74°C with an accelerated speed from 39.15°C in 2001 to 41.89°C in 2015; While the lowest temperature occurred in Daoli District and hardly changed (around 23.18°C). The average increment of LST was 0.10°C, specifically 0.08°C during 2001-2004, 0.09°C during 2005-2008, and 0.12°C during 2009-2015 which showed increased warming rates. 2) The areas in the extremely high temperature, high temperature, and lowest temperature zones increased by 4.92 km² and 104.07 km² and 87.71 km², respectively, with increasing speeds; While the medium temperature and low temperature zones decreased by 110.61 km² and 84.94 km² respectively. The extremely high temperature, high temperature, medium temperature and low temperature zones showed ring-structure from inside urban area, to suburb fringe area, to rural area in the outside. 3) Gravity center of LST moved by 536.9 meters to the south by east from 2001 to 2015; The diverse distances and directions in the gravity center trajectories showed different urban heat patterns in the six districts. In sum, the UHI effects in Harbin enhanced from 2001 to 2015, despite different levels of surface energy changes in varied districts.

Key words: land surface temperature; Mono-window algorithm; energy transfer; Harbin City