

文章编号: 1672-8785(2017)01-0036-06

# 呼和浩特区域地表温度反演及其对土地利用/覆盖类型的响应

青 松<sup>1</sup> 包玉海<sup>1,2</sup> 阿如娜<sup>1</sup>

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古呼和浩特 010022;  
2. 内蒙古师范大学遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010022)

**摘要:** 基于 Landsat TM 和 OLI/TIRS 数据反演了呼和浩特区域的地表温度。经 MODIS 地表温度产品检验, 反演结果的精度较好, 平均相对误差为 5%, 均方根误差为 1.53 ℃ ( $R=0.88$ )。研究结果表明, 不同类型地表的温度不同, 最高值出现在建筑用地上, 最低值出现在植被和水体覆盖区域。地表温度与建筑用地、裸地和半裸地分布之间呈正相关, 而与植被分布呈负相关。建筑用地和裸地对地表温度的影响较大, 而半裸地和植被对其的影响则较稳定。

**关键词:** 地表温度; 土地利用/土地覆盖; 反演; 呼和浩特

中图分类号: TP7 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.01.007

## Land Surface Temperature Retrieval and Its Response to Land Use/Cover Types in Hohhot Metropolitan

QING Song<sup>1</sup>, BAO Yu-hai<sup>1,2</sup>, A Ru-na<sup>1</sup>

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;  
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing of Geography Information System,  
Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

**Abstract:** On the basis of the data from Landsat TM and OLI/TIRS, the Land Surface Temperature (LST) in Hohhot metropolitan area is retrieved. Compared with the MODIS LST products, the retrieved LST shows its good accuracy with an average relative error of 5% and a Root Mean Square Error (RMSE) of 1.53 ℃ ( $R=0.88$ ,  $e=5\%$ ). The research result shows that the LST values of different types of Land Use/Land Cover (LULC) are different. The highest temperature appears in the building land and the lowest temperature appears in the vegetation and water coverage areas. LST is associated positively with the distribution of building land, bare land and semi bare land and is associated negatively with the distribution of vegetation. The building land and bare land have great influences on LST while the semi bare land and vegetation have more stable influences on LST.

**Key words:** land surface temperature; land use/land cover; retrieval; Hohhot

---

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61265008); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0608)

作者简介: 青松(1982-), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 主要从事光学遥感机理及应用研究。

E-mail: chrisqs27@126.com

## 0 引言

地表温度是地球表面物理过程的关键参数, 对能量交换、土地覆盖评估、城市热岛效应和其它地表特征的相关研究具有重要意义 [1~4]。与实地调查相比, 遥感技术能够获取大面积、准同步和实时的地表温度空间分布情况。地表温度反演已成为陆地遥感研究的热点, 国际上已发展了很多反演算法。李召良等很好地总结了地表温度遥感反演算法<sup>[1]</sup>。在区域或全球尺度上, 研究者广泛应用 NOAA/AVHRR 和 MODIS 数据进行地表温度的反演研究<sup>[5~9]</sup>。随着遥感数据空间分辨率的提高, Landsat 热红外波段 (Thermal Infrared, TIR) 已成为主要的反演数据源, 被广泛应用于局地尺度的地表温度反演<sup>[10~16]</sup>。近年来, 其它卫星数据也已被用于地表温度估算研究<sup>[17~19]</sup>。经多年研究发现, 地表温度的变化与土地利用/覆盖类型、植被指数等相关<sup>[20~23]</sup>。然而, 目前有关土地利用/覆盖类型与地表温度之间定量关系的研究较少。土地利用/覆盖类型的景观格局与地表温度之间的关系能够为城市环

境评估、热岛效应监测等提供重要信息。因此, 本文根据 Landsat TM 和 OLI/TIRS 数据, 以呼和浩特区域为研究区, 采用基于影像的算法反演地表温度。同时, 基于网格分析方法, 实现地表温度与土地利用/覆盖类型之间关系的定量化。

## 1 研究区与数据

呼和浩特市位于内蒙古的中部、北纬  $40^{\circ}36'$  ~  $41^{\circ}8'$ 、东经  $111^{\circ}25'$  ~  $112^{\circ}10'$  之间 (图 1), 其北部和东部为大青山山脉, 属于半干旱气候, 冬季寒冷漫长, 夏季炎热, 年平均气温为  $6.73^{\circ}\text{C}$ 。主要土地利用/覆盖类型为林地、草地、耕地、建筑用地、水体、裸地和半裸地。

本文所用的遥感数据为 Landsat TM 、 OLI/TIRS 影像, 成像时间分别为 1998 年 5 月 24 日和 2014 年 8 月 24 日。采用最近邻方法将热红外波段重采样成 30 m 空间分辨率。利用 2014 年 8 月 24 日的 Terra/MODIS 地表温度产品 (MOD11A1, 分辨率为 1 km) 对地表温度反演结果进行精度检验。

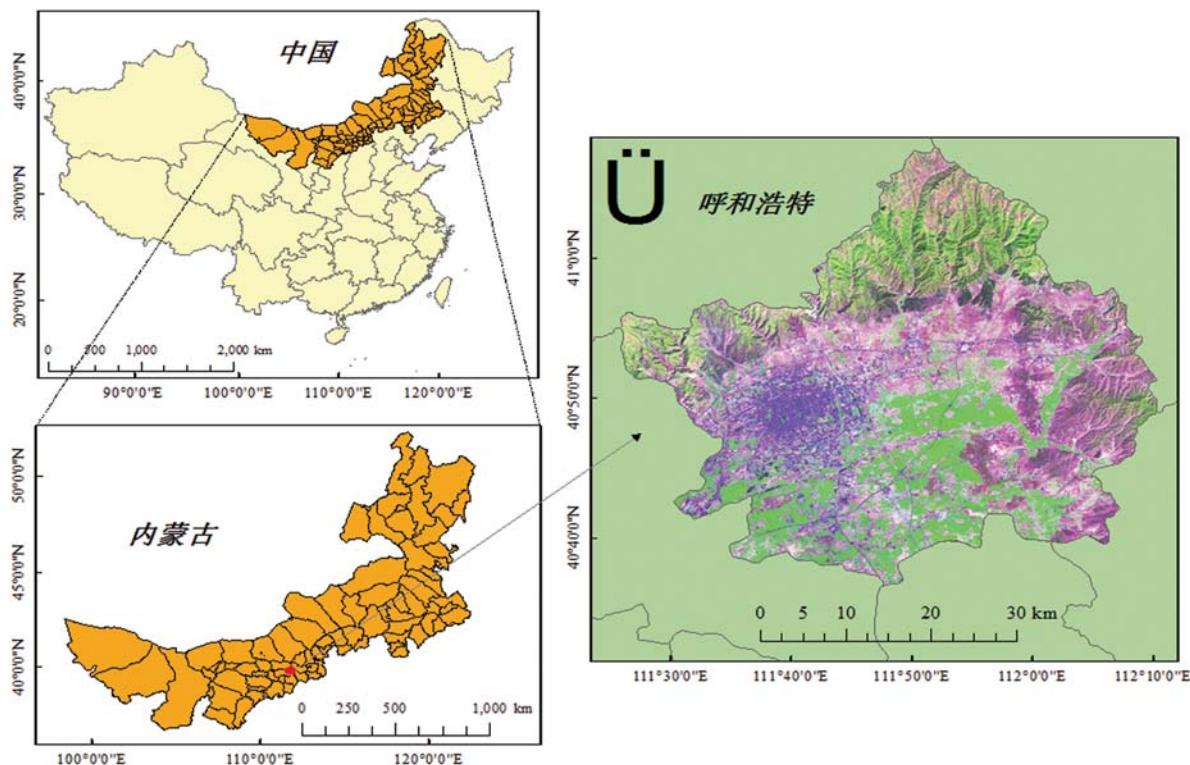


图 1 研究区域的示意图

## 2 反演方法

本文利用 Landsat 数据反演呼和浩特区域的地表温度，并分析地表温度与土地利用 / 覆盖类型之间的定量关系。

### 2.1 土地利用 / 土地覆盖分类

本文将呼和浩特市区域土地利用 / 覆盖类型分为建筑用地、裸地、半裸地、植被和水体五种。首先，在 Landsat 影像中随机选取各类型样本，采用最大似然法进行五种类型的分类；然后，目视判读分类结果，进行分类后修正。选取样本以地形图和实地调查资料为依据。

### 2.2 地表温度反演

采用基于影像的算法进行地表温度反演，具体步骤如下：

(1) 对 Landsat 热红外波段进行辐射定标，即将像元 DN 值转化为辐射亮度值：

$$L_\lambda = \frac{L_{max} - L_{min}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}}(DN - Qcal_{min}) + L_{min} \quad (1)$$

式中， $L_\lambda$  为辐射亮度值， $L_{max}$ 、 $L_{min}$ 、 $Qcal_{max}$ 、 $Qcal_{min}$  的值可从遥感影像头文件中获取。

(2) 将辐射亮度值转化为亮度温度，即

$$T_b = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda + 1)} \quad (2)$$

式中， $T_b$  为亮度温度，对于 TM 数据， $K_1=666.09 \text{ Wm}^{-2} \text{ Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 、 $K_2=1282.71 \text{ K}$ ，对于 TIRS 数据， $K_1=480.89 \text{ Wm}^{-2} \text{ Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ， $K_2=1201.14 \text{ K}$ 。

(3) 计算地表温度：

$$LST = \frac{T_b}{1 + (\lambda \times T_b/\alpha) \ln \varepsilon} - 273.15 \quad (3)$$

式中， $LST$  为地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $\lambda$  为近红外波段的中心波长 (对于 TM 数据， $\lambda=11.5 \mu\text{m}$ ；对于 TIRS 数据， $\lambda=12.5 \mu\text{m}$ )， $\alpha=hc/k$ ， $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ， $c=2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ， $\varepsilon$  为比辐射率。建筑用地、裸地、半裸地、植被和水体的  $\varepsilon$  值分别取为 0.945、0.95、0.965、0.98 和 0.99<sup>[11,12,14]</sup>。

### 2.3 基于网格的定量分析

在研究区范围创建 689 个大小相等的网格，网格大小为  $1800 \times 1800 \text{ m}^2$ 。统计各网格所有像素的地表温度平均值和土地利用 / 覆盖类型所占比例，并将其用于精度检验、相关分析和回归分析。

#### 2.3.1 精度检验

由于无法获取研究区的实测地表温度数据，本文利用 2014 年 8 月 24 日的 MODIS 地表温度产品 MOD11A1 对 TIRS 数据反演结果进行检验，平均误差为

$$e = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^N |\ln(x_i/y_i)|}{N}\right) - 1 \quad (4)$$

式中， $x_i$  和  $y_i$  分别代表反演地表温度和 MODIS 地表温度产品。

#### 2.3.2 相关分析

利用相关系数分析地表温度与土地利用 / 覆盖类型之间的相关性：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中， $x_i$  和  $y_i$  分别代表地表温度和土地利用 / 覆盖类型所占比例。

#### 2.3.3 回归分析

为进一步了解土地利用 / 覆盖类型对于地表温度的影响，以土地利用 / 覆盖类型所占比例为自变量，以地表温度作为因变量，建立多元线性回归模型。首先，对因变量和自变量进行标准化处理，见式 (6)；然后，利用式 (7) 建立多元线性模型；最后，基于式 (8) 得到每个自变量的贡献率。

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (6)$$

$$LST = \sum_{i=1}^n a_i x_i + b \quad (7)$$

$$C_i = \frac{|a_i|}{\sum_{i=1}^n |a_i|} \times 100\% \quad (8)$$

式中,  $x_i$  代表自变量,  $a_i$  和  $b$  分别为斜率和截距,  $X_i$  代表  $x_i$  的标准化值,  $C_i$  为自变量的贡献率。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 呼和浩特市区域的土地利用 / 覆盖分类

1998 年和 2014 年的呼和浩特土地利用 / 覆盖分类结果如图 2 所示, 其总体分类精度分别

为 96.2% 和 92.8%。土地利用 / 覆盖变化情况见表 1。可以看出, 1998 年至 2014 年间呼和浩特市城市扩张很明显, 建筑用地面积从 6.05% 扩展到 17.86%。植被面积从 32.25% 上升到 56.37%, 原因可能是裸地或半裸地转化为植被; 另一方面, 该地区 8 月份(夏末)的植被覆盖率始终比 5 月份(春末)高。水体仅占研究区总面积的 0.16% 和 0.11%。

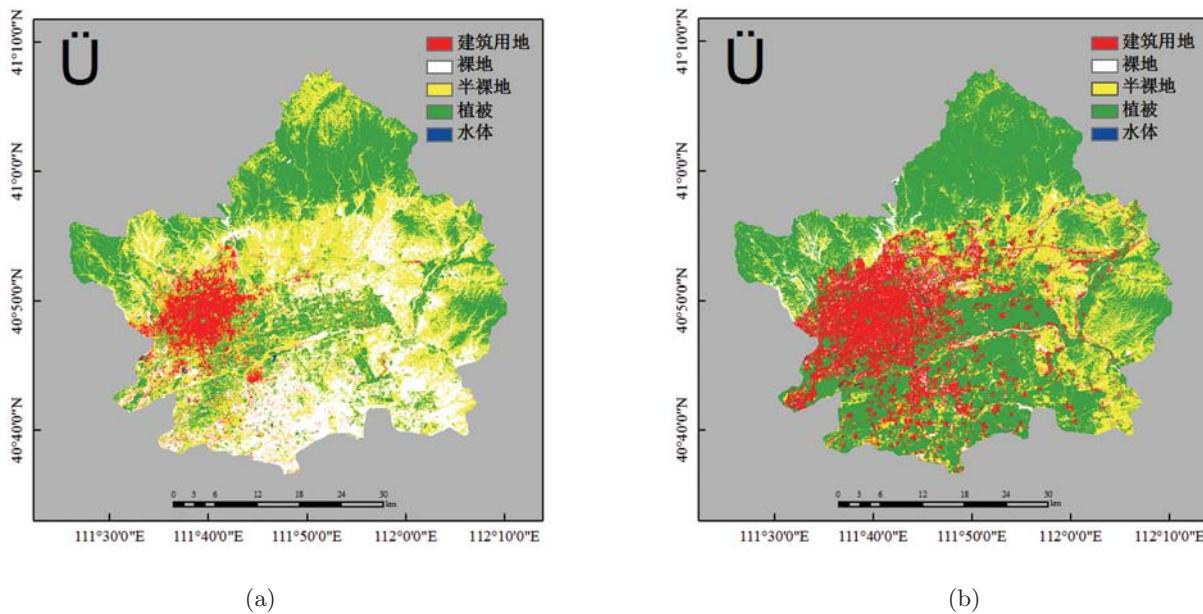


图 2 1998 年 5 月 24 日 (a) 和 2014 年 8 月 24 日 (b) 呼和浩特区域土地利用 / 覆盖分类图

表 1 土地利用 / 覆盖类型的百分比与变化情况

	建筑用地	裸地	半裸地	植被	水体
1998 年 5 月 24 日	6.05%	25.84%	35.70%	32.25%	0.16%
2014 年 8 月 24 日	17.86%	5.60%	20.06%	56.37%	0.11%
变化率	+11.81%	-20.24%	-15.64%	+24.12%	-0.05%

#### 3.2 地表温度的空间格局

利用 MODIS 地表温度产品检验 Landsat 反演的结果, 图 3 对比了 TIRS 反演的地表温度和 MODIS 地表温度。用 Landsat 数据反演的地表温度与 MODIS 地表温度产品的一致性较好, 均方根误差为 1.53 °C ( $R=0.88, e=5\%$ ), 表明基于影像的地表温度算法适用于研究区的温度反演。

研究区地表温度的空间格局如图 4 所示, 各土地利用 / 覆盖类型的地表温度均值及标准

差见表 2。1998 年 5 月 24 日(春末), 平均地表温度为 21.4 °C (标准差为 3.4 °C); 而 2014 年 8 月 24 日(夏末), 平均地表温度为 25.4 °C (标准差为 3.7 °C)。整体来看, 建筑用地的平均温度最高, 其次为裸地和半裸地; 而最低温度出现在水体区, 其次为植被区。从 1998 年的地表温度图中可以看出, 从市中心到周围郊区存在明显的地表温度梯度; 然而 2014 年这种变化趋势并不明显, 其原因可能是建筑用地、裸地和半裸地之间

的平均地表温度差异较小。不同土地覆盖类型的地表温度不同，并且地表温度与土地利用 / 覆盖类型分布格局之间具有较高的一致性。

### 3.3 相关分析

我们对 1998 年和 2014 年的地表温度与土地利用 / 覆盖类型进行了相关分析，得到的结果见表 3：(1) 地表温度与建筑用地之间存在正相关，相关系数分别为 0.47 和 0.56。(2) 地表温度与裸地之间存在正相关，相关系数分别为 0.56 和 0.47。(3) 1998 年地表温度与半裸地之间几乎没有相关性，而 2014 年却有明显的正相关。(4) 地表温度与植被之间存在显著负相关，相关系数分别为 -0.76 和 -0.91。由于水体所占的比例很小，因此本文忽略水体与地表温度之间的相关性。上述结果表明，地表温度与土地覆盖类型有显著的相关性。植被是对地表温度影响最大的土地覆盖类型，有明显的降温效果。地表温度与

各土地覆盖类型之间的相关系数差异在很大程度上是由不同土地覆盖类型对地表温度影响程度的不同引起的；另一方面，春季和夏季的气温差异较大，地表温度也会受影响。

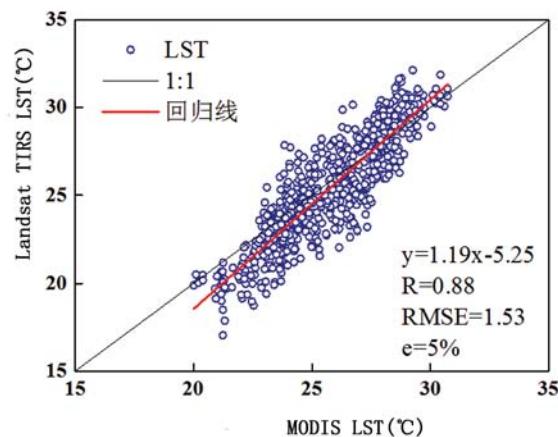
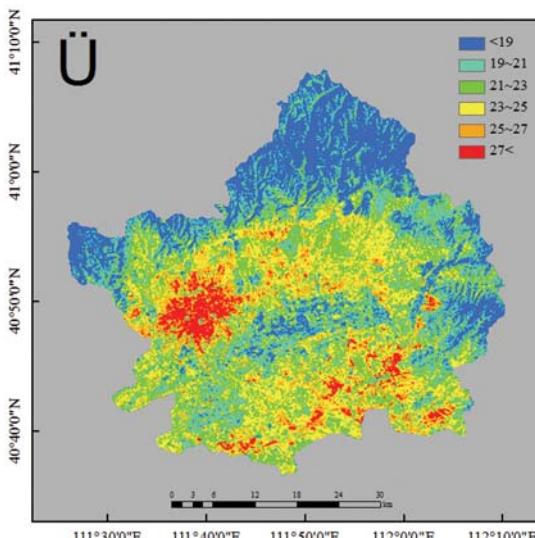
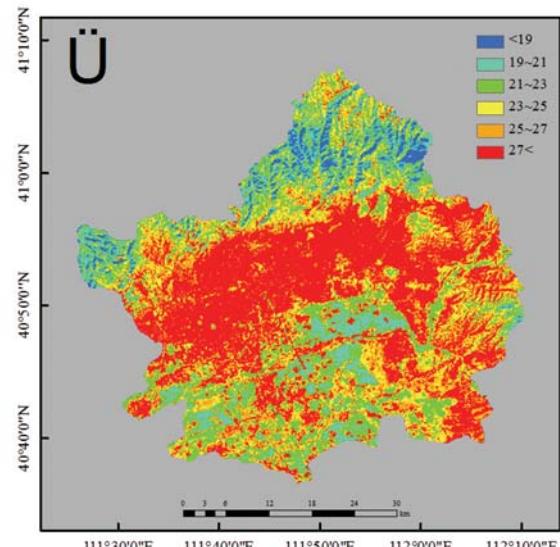


图 3 用 2014 年 8 月 24 日的 Landsat 数据反演的地表温度与 MODIS 地表温度产品的对比



(a)



(b)

图 4 1998 年 5 月 24 日 (a) 和 2014 年 8 月 24 日 (b) 呼和浩特及周边地区地表温度图

表 2 各土地利用 / 覆盖类型地表温度的平均值和标准差

	建筑用地	裸地	半裸地	植被	水体	总体
1998 年 5 月 24 日	$26.4 \pm 2.2$	$24.2 \pm 1.7$	$21.5 \pm 2.1$	$18.2 \pm 2.4$	$17.4 \pm 2.9$	$21.4 \pm 3.4$
2014 年 8 月 24 日	$29.3 \pm 1.8$	$29.0 \pm 2.2$	$28.0 \pm 2.0$	$22.8 \pm 2.5$	$21.7 \pm 1.5$	$25.4 \pm 3.7$

表3 地表温度与土地利用 / 覆盖类型之间的相关性

	建筑用地	裸地	半裸地	植被	水体
1998年5月24日	0.47	0.56	0.08	-0.81	0.05
2014年8月24日	0.56	0.47	0.49	-0.91	0.04

### 3.4 回归分析

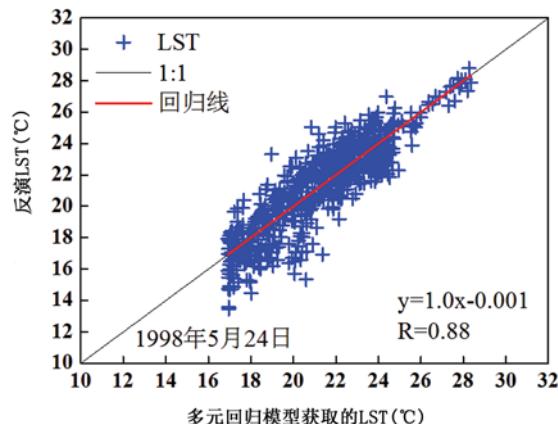
以土地利用 / 覆盖类型为自变量, 建立多元线性回归模型:

$$\begin{aligned} LST_{1998} = & 0.204x_1 + 0.164x_2 + 0.133x_3 \\ & + 0.085x_4 + 8.393 \quad (R = 0.88) \end{aligned} \quad (9)$$

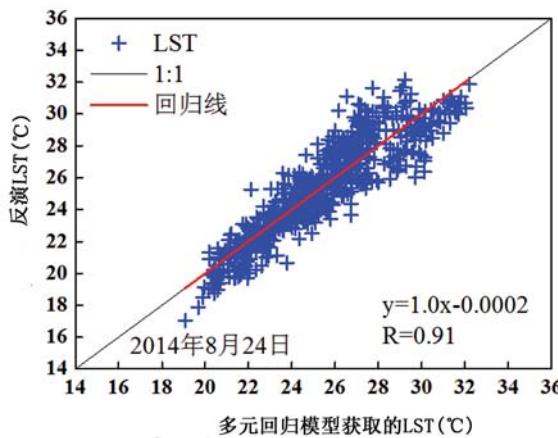
$$\begin{aligned} LST_{2014} = & 0.343x_1 + 0.336x_2 + 0.349x_3 \\ & + 0.250x_4 - 3.767 \quad (R = 0.92) \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  分别表示建筑用地、裸地、半裸地和植被所占比例。回归线如图 5 所示,  $R$  值分别为 0.88 和 0.92。

从图 5 中可以看出, 多元线性回归模型能够解释地表温度 88% 和 92% 的变化。1998 年和 2014 年的土地利用 / 覆盖类型对地表温度的贡献率见表 4。建筑用地对研究区地表温度的贡献率大, 从 1998 年的 25.51% 上升到了 2014 年的 33.08%, 其主要原因是呼和浩特城区在近十几年得到了快速扩张。裸地贡献率从 33.96% 下降到了 9.54%, 原因是 1998 年大部分裸地转化为 2014 年的其它土地 (转化了 20.24%), 说明裸地对于地表温度的影响也较大。植被对于地表温度有调节作用, 主要原因是其比辐射率大, 因此在 1998 年和 2014 年半裸地 (长有稀疏植被的土地) 和植被的贡献率比较稳定。



(a)



(b)

图 5 1998 年 (a) 和 2014 年 (b) 地表温度多元回归模型

表4 1998年和2014年各土地利用 / 覆盖类型对地表温度的贡献率

	建筑用地	裸地	半裸地	植被
1998年5月24日	25.51%	33.96%	20.73%	19.80%
2014年8月24日	33.08%	9.54%	28.34%	29.04%

## 4 结论

根据 Landsat TM 和 OLI/TIRS 数据, 采用基

于影像的算法反演了呼和浩特及周边地区的地表温度。经 MODIS 地表温度产品检验, 其精度比较理想, 均方根误差为 1.53 ℃ ( $R=0.88, e=5\%$ )。不

同土地利用类型的地表温度不同，最高值出现在建筑用地上，最低值出现在植被和水体区。1998 年地表温度从市中心到郊区有明显的梯度，而 2014 年则不明显，其原因可能是不同时期的气候条件和土地利用 / 覆盖类型不同。地表温度与建筑用地、裸地和半裸地呈正相关，而与植被呈现显著的负相关。建筑用地和裸地对地表温度的影响较大，而半裸地和植被的贡献率较稳定，主要由于它们的比辐射率不同。由于无法获取气象数据，因此本文未考虑气象因素对地表温度格局的影响。进一步的研究应增加实测地表温度数据和降雨、蒸发量等气象数据，以全面检测地表温度变化的影响因素。

## 参考文献

- [1] Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. Satellite-derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**:14–37.
- [2] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C. Minimum Configuration of Thermal Infrared Bands for Land Surface Temperature and Emissivity Estimation in the Context of Potential Future Missions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **148**: 158–167.
- [3] Huang F, Zhan W F, Duan S B, et al. A Generic Framework for Modeling Diurnal Land Surface Temperatures with Remotely Sensed Thermal Observations under Clear Sky [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **150**:140–151.
- [4] 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.
- [5] Yang H, Yang Z D. A Modified Land Surface Temperature Split Window Retrieval Algorithm and Its Applications over China [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, **52**:207–215.
- [6] Sheng J F, Wilson J P, Lee S J. Comparison of Land Surface Temperature (LST) Modeled with a Spatially Distributed Solar Radiation Model (SRA-D) and Remote Sensing Data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**:436–443.
- [7] Coll C, Caselles V, Valor E, et al. Comparison between Different Sources of Atmospheric Profiles for Land Surface Temperature Retrieval from Single Channel Thermal Infrared Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **117**:199–210.
- [8] Hu L Q, Brunsell N A. The Impact of Temporal Aggregation of Land Surface Temperature Data for Surface Urban Heat Island (SUHI) Monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**: 162–174.
- [9] Lazzarini M, Marpu P R, Ghedira H. Temperature-land Cover Interactions: The Inversion of Urban Heat Island Phenomenon in Desert City Areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **130**:136–152.
- [10] Li J J, Wang X R, Wang X J, et al. Remote Sensing Evaluation of Urban Heat Island and Its Spatial Pattern of the Shanghai Metropolitan Area, China [J]. *Ecological Complexity*, 2009, **6**:413–420.
- [11] Li Y Y, Zhang H, Kainz W. Monitoring Patterns of Urban Heat Islands of the Fast-growing Shanghai Metropolis, China: Using Time-series of Landsat TM/ETM+ data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, **19**: 127–138.
- [12] Deng C B, Wu C S. Examining the Impacts of Urban Biophysical Compositions on Surface Urban Heat Island: A Spectral Unmixing and Thermal Mixing Approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 262–274.
- [13] Senanayake I P, Welivitiya W D D P, Nadeeka P M. Remote Sensing Based Analysis of Urban Heat Islands with Vegetation Cover in Colombo City, Sri Lanka Using Landsat-7 ETM+ Data [J]. *Urban Climate*, 2013, **5**:19–35.
- [14] Weng Q H, Fu P. Modeling Annual Parameters of Clear-sky Land Surface Temperature Variations and Evaluating the Impact of Cloud Cover Using Time Series of Landsat TIR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**:267–278.
- [15] Ghosh A, Joshi P K. Hyperspectral Imagery for Disaggregation of Land Surface Temperature with Selected Regression Algorithms over Different Land Use Land Cover Scenes [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **96**:76–93.
- [16] Song J E, Du S H, Feng X, et al. The Relationships between Landscape Compositions and Land Surface Temperature: Quantifying Their Resolution Sensitivity with Spatial Regression Models [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **123**:145–157.
- [17] Guo Z, Wang S D, Cheng M M, et al. Assess the Effect of Different Degrees of Urbanization on Land Surface Temperature Using Remote Sensing Images [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**:935–942.

(下转第 48 页)