

文章编号: 2096-1618(2024)03-0328-06

# 呼和浩特市新城区城市热岛效应趋势预测模型构建

苏慧怡, 卞玉霞, 褚永彬

(成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**随着城市化进程的不断推进,对生态环境和人类健康带来裂变式影响的热岛效应成为当今社会备受关注的热点问题。如何对热岛效应进行预测研究成为颇受重视的学术议题。通过以内蒙古呼和浩特市新城区为研究对象,运用2013–2020年7期landsat8遥感影像数据对城市地表温度进行反演研究,通过分析影响因子与地表温度空间变化之间的映射关系和所占权重,构建适用于呼和浩特市城区的热岛效应预测模型,并在呼和浩特市赛罕区进行验证,进一步验证所构建模型的准确性。通过计算趋势预测方程,表明新城区的热岛效应会继续加重,但增长速度将逐渐趋于平缓。该预测模型一方面可以预测城市地表温度的变化趋势,另一方面可以为制定预防和减缓热岛效应加剧的措施提供理论依据。

**关键词:**热岛效应;地表温度;空间变化分析;因素分析;预测模型

中图分类号:P407.8

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.03.010

## 0 引言

随着中国城市化进程的不断加快,随之而来的气候变暖、生态失衡、环境污染等问题层出不穷。其中热岛效应问题尤为突出,其带来的负面危害更加值得深思。城市热岛效应是指城市气温高于郊区的一种城市化现象<sup>[1]</sup>,它一方面致使高温灾害发生次数逐年增长<sup>[2–3]</sup>,严重威胁着城市的生态环境以及居民的生存条件,另一方面阻碍着城市经济的可持续发展<sup>[4]</sup>。因此如何预测和缓解热岛效应成为近几年人们关注的焦点<sup>[5–6]</sup>。

近年来国内外学者基于遥感影像对城市热岛效应进行了大量研究<sup>[7–11]</sup>。Grover等基于Landsat影像对孟买市进行地表温度反演,分析了热岛因时空变化对城市发展的影响。大量国内学者对热岛效应的影响因素进行研究,发现人为碳排放量、人口数量、植被覆盖度等与热岛效应相关性十分显著<sup>[12–16]</sup>。中国近几年出现明显变暖趋势,夏季气温不断突破历史最高温记录,北方城市尤为严重<sup>[17]</sup>。随着城市的不断扩张以及人口的迅速增长<sup>[18]</sup>,城市热岛效应的强度和范围在未来的一段时间内会持续扩张。所以,当务之急便是研究热岛效应产生的因素并且预测其发展趋势,用以制定相应的缓解措施。

本文利用Landsat8卫星数据,通过对呼和浩特市新城区地表温度的空间分布变化以及影响热岛效应多个因子的相关性分析,构建适用于城市热岛效应的预测模型,以此预测热岛强度的发展趋势,并进一步制定改善城市生态环境的有效措施。此模型不仅有利于合

理规划与布局城市结构,对于提高居民的生活质量也具有重要意义。

## 1 测区概况

呼和浩特市新城区位于内蒙古自治区东部,占地面积为699.6 km<sup>2</sup>,平均海拔高度为1040 m;年平均温度为7.5℃~8.3℃,属于典型的中温带大陆性季风,年温差很大,平均年温差为34.4℃~35.7℃;夏季最高气温可达38.5℃,冬季最低气温可至-41.5℃,冬季寒冷、夏季酷热。年平均降水量为335.2~534.6 mm,降水主要集中在7–8月,其他月份干燥少雨。同时,该地区地表水源较少,较大的河流只有6条,且多数是由雨季型沟谷的水源汇流而成。图1是本文研究区域“新城区”和检验区域“赛罕区”的地理位置。



图1 位置图

收稿日期:2022-10-17

基金项目:四川省科技计划资助项目(2023YFG0299)

通信作者:卞玉霞, E-mail:byx310@163.com

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本文的研究数据包括两个部分,分为用于温度反演的遥感影像数据和用于影响因子分析的统计年鉴数据。本文选取 2013 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年、2019 年、2020 年呼和浩特市新城区和 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年赛罕区夏季云量小于 5% 的 Landsat 8 OLI\_TIRS 卫星数字产品进行研究,其遥感影像数据在地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) 下载;人口数、降水量、碳消费总量、工业总值、PM<sub>2.5</sub> 年日均值指标的原始数据来自 2013 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年、2019 年的《呼和浩特市统计年鉴》。

2.2 线性回归分析法

线性回归是利用线性回归方程的最小平方函数对一个或多个自变量和因变量之间关系进行建模的一种回归分析,分为一元回归和多元回归。其中多元回归分析是指分析因变量和多个自变量之间关系,一种现象常常与多个因素相联系,由多个自变量的最优组合来预测或估计因变量,比只用一个自变量进行预测或估计更有效、更符合实际。其回归模型可表示为

$$y=\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_nx_n \tag{1}$$

其中: $y$  是因变量; $x_1,x_2,\cdots,x_n$  是自变量; $\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_n$  称为待定系数。

多元回归方程的各自变量和因变量之间没有严格

的、确定性的相关关系,但可以设法找出最能代表它们之间关系的数学表达形式。判定系数( $R^2$ )是回归平方和与总离差平方和的比值,是判定某一自变量和因变量线性相关关系的重要指标,反映该自变量对因变量取值的决定程度,可由式(2)计算得出。因此可以选取各自变量对因变量的判定系数作为多元回归方程的待定系数。

$$R^2=SSR/SST=1-SSE/SST \tag{2}$$

其中:SSR 为回归平方和;SSE 为残差平方和;SST 为总离差平方和。

为更加准确地判定各自变量对因变量的权重,要使各自变量对因变量的累计影响率达到 100%,需对各自变量的判定系数进行信息贡献率计算,因此各信息贡献率为所构建模型的最最终待定系数,计算公式如下:

$$\beta_i=R_i^2/(R_1^2+R_2^2+\cdots+R_n^2)\times 100\% \tag{3}$$

其中: $i=1,2,\cdots,n$ ; $\beta_i$  为贡献率; $R_i^2$  为判定系数。

3 模型构建

3.1 地表温度提取及空间分析

基于所选取的 7 年呼和浩特市新城区 Landsat 8 遥感影像数据,采用遥感处理软件 ENVI 进行影像处理。经过辐射定标、大气校正、图像剪裁等图像预处理后使用辐射传导方程法<sup>[19-20]</sup>进行地表温度反演,图 2 是反演得到的呼和浩特市新城区地表温度图。通过统计研究区地表温度数据的平均值,获得 2013-2019 年 7 年的城区地表温度值,如表 1 所示。

表 1 2013-2020 年呼和浩特市新城区地表温度值 单位:℃

| 影响因素 | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2019 年  | 2020 年  |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度   | 29.0583 | 28.7143 | 31.0943 | 28.7364 | 35.8032 | 40.1293 | 24.8658 |

由图 2 可知,2013-2020 年新城区地表温度从城市中心逐渐向郊区递减,在 2013 年,高温区零星分布在市区中心,城市热岛效应还不明显;从 2014 年开始,高温区面积逐渐向北部扩大,由于缺少 2016 年 7 月的遥感影像数据,只能选取同年 9 月的影像数据进行研究,因研究区 9 月温度较低,故该年地表温度图效果不明显。到 2020 年,位于新城区北部的郊区及城市公园、绿地等自然植被覆盖区域低温现象明显,但位于新城区南部人口密度大的城镇建成区温度整体上升,市区地表温度明显高于周边郊区,形成岛形的高温区,且边界越来越清晰,热岛现象显著。

3.2 影响因子分析

3.2.1 植被覆盖度

植被覆盖度是指植被在地面部分的垂直投影面积与研究区域总面积之比。由表 2 可知,地表温度呈上升趋势而植被覆盖度却逐年降低,说明植被覆盖度与地表温度呈负相关,大量种植植被可以抑制温度上升。随着城市快速发展,城市不断向郊区扩张,市区植被覆盖量越来越低,因此市区范围地表温度将逐年增高,城市热岛效应加剧。

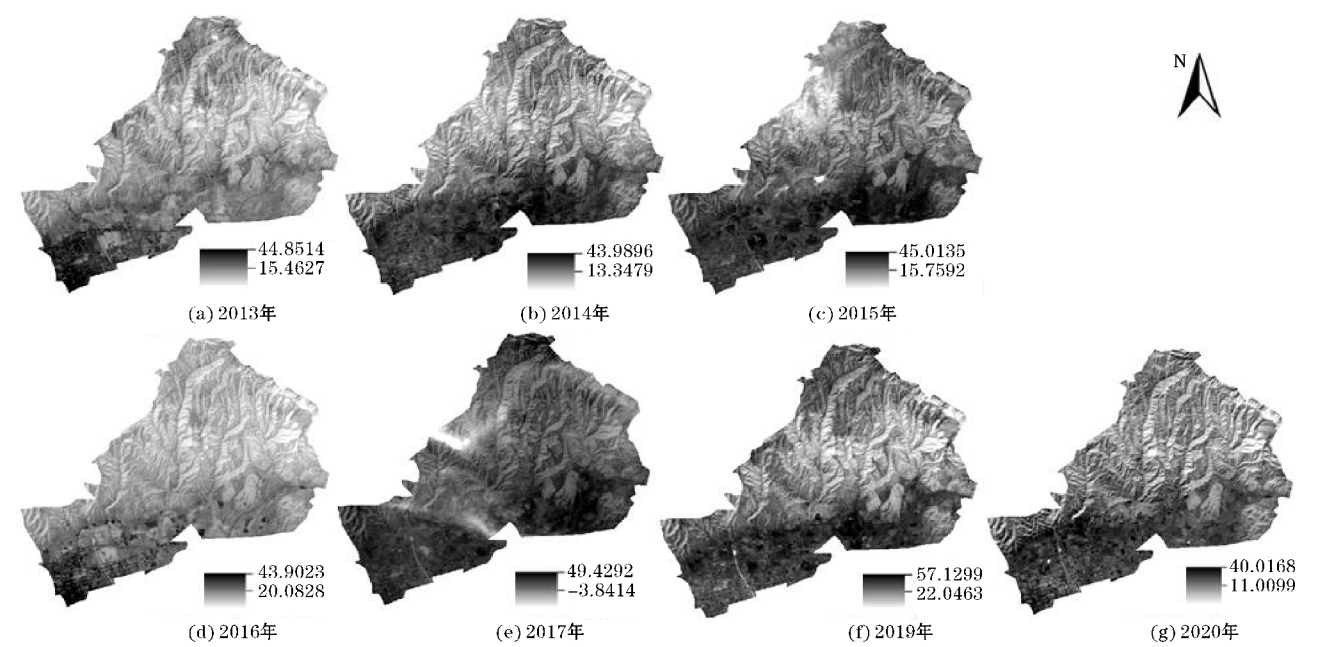


图 2 呼和浩特市新城区地表温度

表 2 不同年份植被覆盖度

| 影响因素  | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2019 年  | 2020 年  |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度/℃  | 29.0583 | 28.7143 | 31.0943 | 28.7364 | 35.8032 | 40.1293 | 24.8658 |
| 植被覆盖度 | 0.8244  | 0.7469  | 0.6640  | 0.6439  | 0.5567  | 0.6076  | 0.5476  |

对植被覆盖度和地表温度进行数据相关性分析,得到如图 3 所示的结果图。图中  $R^2$  表示的是回归平方和在总平方和中所占的比率,即回归方程所能解释的因变量变异性的百分比。当  $R^2$  越接近 1,两者的线性相关性越大。本文植被覆盖度和地表温度之间的判定系数  $R^2=0.7223$ ,说明变量  $y$  的变异性中有 72.23% 是由自变量  $x$  引起的,说明呼和浩特市新城区植被覆盖度的变化对地表温度变化有着较大影响。另外,由植被覆盖度和地表温度的线性变化趋势可以得出,随着植被覆盖度的增长温度在逐渐下降,植被覆盖度降低是形成城市热岛效应的一个重要影响因素。

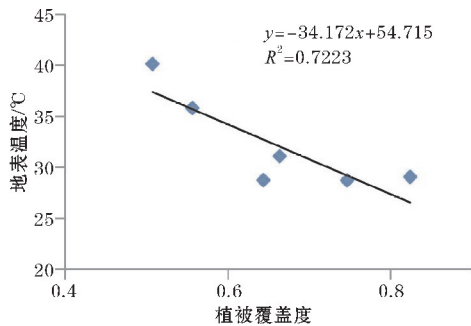


图 3 地表温度与 NDVI 相关关系

3.2.2 降水量

降水量与地表温度密切相关,一方面大量降水对降温具有一定效果,另一方面城市热岛效应也会使降水量受到影响,当城市热岛效应严重时,城市中空气处于膨胀状态,城市上空的云团因空气膨胀而远离城市,导致城市上空的云量减少,致使降水量不断减少。表 3 为各年份日均降水量,可以看到降水量与地表温度呈负相关。对降水量和地表温度进行数据相关分析,如图 4 所示。图 4 中  $R^2=0.3082$ ,说明降水量在一定程度上影响城市地表温度,但影响值不大。

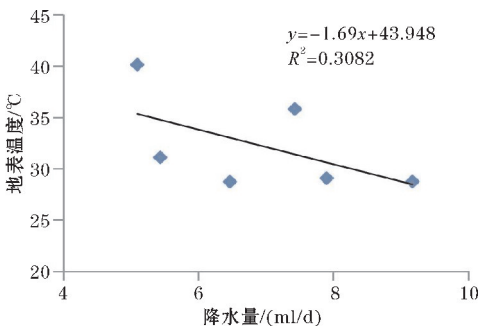


图 4 地表温度与降水量相关关系

表 3 不同年份日均降水量

| 影响因素       | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2019 年  | 2020 年  |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度/℃       | 29.0583 | 28.7143 | 31.0943 | 28.7364 | 35.8032 | 40.1293 | 24.8658 |
| 降水量/(ml/d) | 7.9     | 6.47    | 5.44    | 9.17    | 7.43    | 5.1     |         |



3.2.3 人口数

随着城市发展不断推进,2013–2019 年新城区人口数量呈现上升趋势,增长约 5 万人口。加上大量农村人口向城镇聚集,加剧了城市的人口负担。表 4 为近几年呼和浩特新城区人口统计表,可以看出随着人口增长,地表温度逐年升高。人口数与地表温度呈正

表 4 呼和浩特市新城区人口统计表

| 因素    | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2019 年  | 2020 年  |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度/℃  | 29.0583 | 28.7143 | 31.0943 | 28.7364 | 35.8032 | 40.1293 | 24.8658 |
| 人口数/人 | 376866  | 385274  | 393124  | 398028  | 405563  | 426358  |         |

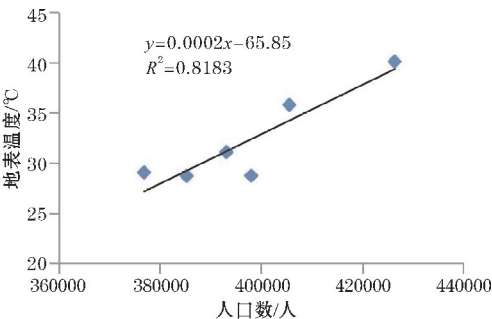


图 5 地表温度与人口数相关关系

3.2.4 碳消费总量、工业总值、PM<sub>2.5</sub> 年日均值

由于社会经济的快速发展,城市化建设不断增加,

相关,人口的大量增长会导致热岛效应更加严重。图 5 是呼和浩特新城区人口数与温度的相关性分析图,图中人口数与温度呈较为明显的线性关系,判定系数  $R^2=0.8183$ ,表明人口数量对城市地表温度影响较大,人口变化是形成城市热岛效应的重要因素。

需要燃烧大量的碳来维持城市的日常运转,碳燃烧产生的大量热量进入大气,使城市气温越来越高。碳燃烧产生的硫和氮也将转化为 PM<sub>2.5</sub>,影响降水量以及气温,致使地表温度升高。具体数值如表 5 所示。

如图 6~8 所示,碳消费总量、工业总值、PM<sub>2.5</sub> 的判定系数分别为  $R^2 = 0.8191$ 、 $R^2 = 0.3811$ 、 $R^2 = 0.4054$ ,对地表温度的影响程度从大到小的顺序依次为碳消费总量>PM<sub>2.5</sub>>工业总值。可以看出碳的大量排放是形成热岛的重要因素,由于日渐严重的环境污染,政府意识到 PM<sub>2.5</sub>治理的重要性并且实施相关措施加以治理,导致 PM<sub>2.5</sub>呈下降趋势。

表 5 不同年份碳消费总量、工业总值、PM<sub>2.5</sub> 年日均值

| 影响因素                                       | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2019 年  | 2020 年  |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度/℃                                       | 29.0583 | 28.7143 | 31.0943 | 28.7364 | 35.8032 | 40.1293 | 24.8658 |
| 碳消费总量(t/d)                                 | 3.82    | 4.05    | 4.20    | 4.23    | 4.52    | 4.73    |         |
| 工业总值/万元                                    | 322621  | 343414  | 339431  | 340123  | 231129  | 304100  |         |
| PM <sub>2.5</sub> 年日均值(μg/m <sup>3</sup> ) | 57      | 46      | 43      | 43      | 44      | 37      |         |

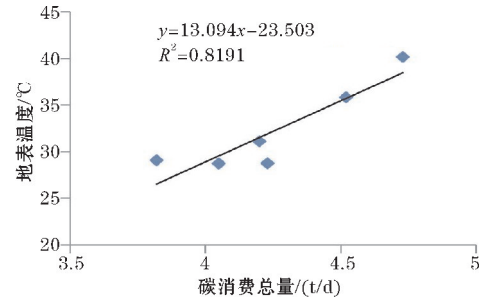


图 6 地表温度与碳消费总量相关关系图

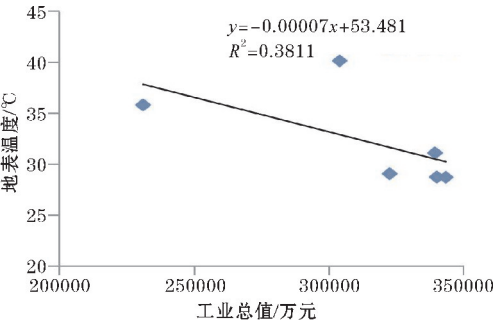


图 7 地表温度与工业总值相关关系图

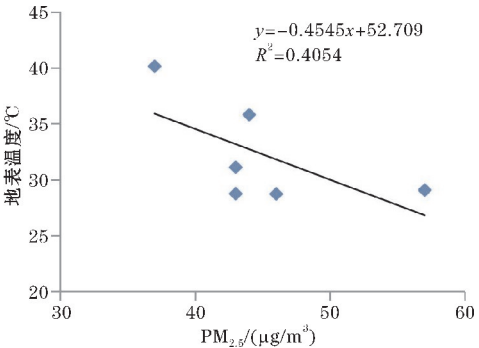


图 8 地表温度与 PM<sub>2.5</sub> 相关关系图

3.3 趋势预测方程推导

本文选取植被覆盖度、降水量、人口数、碳消费总量、工业总值、PM<sub>2.5</sub>与地表温度的判定系数  $R^2$  作为城市热岛判定指数,经过比例计算得到各个因子对地表温度的影响率(表 6),把计算出的影响率作为权数,就可以计算呼和浩特市新城区的城市热岛综合指数  $Y$ :

$$Y=0.2091X_1+0.2369X_2+0.0892X_3+0.2371X_4+0.1103X_5+0.1174X_6$$

其中: $X_1$  为 NDVI; $X_2$  为人口数; $X_3$  为降水量; $X_4$  为碳消费总量; $X_5$  为工业总值; $X_6$  为  $PM_{2.5}$ 。

由式(4)中的权数可知碳消费总量、人口数以及植被覆盖度对地表温度的影响效果较大,是导致城市热岛效应形成以及加重的主要影响因素,可以通过控

制碳的燃烧和人口的增长以及大量植树造林来缓解热岛效应。降水量、工业总值和  $PM_{2.5}$  的所占权数虽然较小,但也对地表温度有一定影响。热岛效应是由各种影响因素共同作用的结果,通过计算趋势预测方程,可以初步判定热岛效应的强度,用于预测热岛效应的发展趋势。就研究区来说,新城区的热岛效应会继续加重,但增长速度会逐渐趋于平缓。

表 6 判定系数与影响率

| 指标    | 植被覆盖度  | 人口数    | 降水量    | 碳消费总量  | 工业总值   | $PM_{2.5}$ |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| $R^2$ | 0.7223 | 0.8183 | 0.3082 | 0.8191 | 0.3811 | 0.4054     |
| 影响率   | 20.91  | 23.69  | 8.92   | 23.71  | 11.03  | 11.74      |

3.4 实验验证

本研究通过选取呼和浩特市赛罕区的相同影响因子来验证本文构建的趋势预测方程的合理性。通过对不同年份的地表温度影像数据进行反演得到赛罕区如表 7 所示的地表温度数据。

表 7 不同年份赛罕区地表温度

| 影响因素 | 2013 年  | 2015 年  | 2017 年  | 2019 年  |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 温度/℃ | 30.1756 | 35.0958 | 38.3626 | 47.0318 |

表 8 是赛罕区 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年 6 个影响因素的各项数据。将表 8 中的数据分别带入式(4)中,可以得到赛罕区 4 年的城市热岛综合指数  $Y$ ,如表 9 所示。由表 9 可知,城市热岛综合指数逐年增加,理论上可以说明呼和浩特市赛罕区热岛效应显著而且越来越严重;由表 7 可知检验区的地表温度逐年递增,表明热岛效应逐年加剧。将计算得到的城市热岛综合指数和反演得到的 4 年地表温度进行对比,发现其均呈增长趋势。通过上述分析,间接验证热岛趋势预测方程的合理性,因此该方程可以用来初步预测热岛效应趋势。

表 8 不同年份赛罕区各因子数据

| 影响因素                                | 2013 年 | 2015 年 | 2017 年 | 2019 年 |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 植被覆盖度                               | 0.7635 | 0.3878 | 0.6665 | 0.3587 |
| 降水量(ml/d)                           | 7.9    | 5.44   | 7.43   | 5.1    |
| 人口数/人                               | 430773 | 468536 | 501586 | 541777 |
| 碳消费总量(t/d)                          | 3.82   | 4.20   | 4.52   | 4.73   |
| 工业总值/万元                             | 322621 | 339431 | 331129 | 304100 |
| $PM_{2.5}$ 年日均值<br>/( $\mu g/m^3$ ) | 57     | 43     | 44     | 37     |

表 9 不同年份赛罕区城市热岛综合指数  $Y$

| 影响因素 | 2013 年      | 2015 年      | 2017 年      | 2019 年      |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $Y$  | 137643.6818 | 148442.0280 | 155356.2915 | 161895.1965 |

4 结束语

本文基于 Landsat 8 影像数据,对呼和浩特市新城区 2013–2020 年 7 年地表温度进行反演,通过分析热岛效应形成的多个影响因子与地表温度之间的相关关系,分别计算各因子的影响率,构建热岛效应趋势预测模型。将该模型应用在赛罕区,验证本文构建的热岛预测模型的准确性。可为控制城市热岛效应的扩展提供理论基础。通过本文研究得到如下结论:

- (1)通过地表温度空间分布变化分析,可以得到城市中的温度越来越高,郊区乡村的温度有所降低,高温范围向郊区乡村蔓延,城市热岛效应逐年加剧。
- (2)通过各个因子对地表温度的判定系数  $R^2$ ,计算得出每个因子的权数,得到城市热岛效应趋势预测方程式。
- (3)把赛罕区各因子数据带入预测方程,与反演得到的地表温度进行对比,验证趋势预测方程式的合理性。

参考文献:

[1] 彭保发,石忆邵,王贺封,等.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:2013,68(11):1462–1470.

[2] 黄晓军,王博,刘萌萌,等.中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J].地理研究:2020,39(7):1534–1547.

[3] 姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展[J].生态学报:2018,38(3):1134–1147.

[4] 吴凡,景元书,李雪源,等.南京地区高温热浪对心脑血管疾病日死亡人数的影响[J].环境卫生

- 学杂志:2013,3(4):288-292.
- [5] 赵志刚,余德,何宁,等. 赣西三市热环境时空演变特征及影响因素[J]. 生态科学:2019,38(3):174-181.
- [6] 乔治,田光进. 北京市热环境时空分异与区划[J]. 遥感学报:2014,18(3):715-734.
- [7] 徐伟,朱超,杨晓月,等. 近10年上海城市热岛效应时空变化特征[J]. 大气科学研究与应用:2014,(2):65-72.
- [8] 潘明慧,兰思仁,朱里莹,等. 景观格局类型对热岛效应的影响:以福州市中心城区为例[J]. 中国环境科学:2020,40(6):2635-2646.
- [9] 乔治,黄宁钰,徐新良,等. 2003-2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. 地理学报:2019,74(3):475-489.
- [10] 曹畅,李旭辉,张弥,等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. 环境科学:2017,38(10):3987-3997.
- [11] 杨智威,陈颖彪,吴志峰,等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J]. 资源科学:2019,41(6):1154-1166.
- [12] 潘明慧,兰思仁,朱里莹,等. 景观格局类型对热岛效应的影响:以福州市中心城区为例[J]. 中国环境科学:2020,40(6):2635-2646.
- [13] 孙艳伟,王润,郭青海,等. 基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析[J]. 环境科学:2021,42(1):501-512.
- [14] 熊鹰,章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报:2020,75(11):2443-2458.
- [15] 沈中健,曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究[J]. 地理科学:2020,40(5):842-852.
- [16] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等. 1989-2015年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. 中国环境科学:2019,39(4):1734-1743.
- [17] 王靓,孟庆岩,吴俊,等. 2005-2014年北京市主要城建区热岛强度时空格局分析[J]. 地球信息科学学报:2015,17(9):1047-1054.
- [18] 尔德尼其其格,阿尔滕图雅,乌敦. 基于GIS和RS的呼和浩特市近百年城市空间扩展及其演变趋势[J]. 干旱区资源与环境:2013,27(1):33-39.
- [19] 宋挺,段峥,刘军志,等. Landsat 8数据地表温度反演算法对比[J]. 遥感学报:2015,19(3):451-464.
- [20] 金点点,宫兆宁. 基于Landsat系列数据地表温度反演算法对比分析:以齐齐哈尔市辖区为例[J]. 遥感技术与应用:2018,33(5):830-841.

## Construction of Trend Prediction Model of Urban Heat Island Effect in New Urban Areas of Hohhot City

SU Huiyi, BIAN Yuxia, CHU Yongbin

(College of Resources and Environmental, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** With the continuous advancement of urbanization, the heat island effect (UHI) has become a hot spot in today's society. How to predict the heat island effect has become a very important academic topic. This study takes the new urban area of Hohhot, Inner Mongolia as the research object, and uses Landsat8 remote sensing image data of 7 periods from 2013 to 2020 to retrieve the urban land surface temperature. By analyzing the mapping relationship and the weight between the influencing factors and the spatial change of land surface temperature, the heat island effect prediction model suitable for the urban area of Hohhot is built. The model is verified in Saihan District of Hohhot, and the accuracy of the model is further verified. By calculating the trend prediction equation, it is shown that the heat island effect of new urban areas will continue to increase, but the growth rate will gradually be flat. On the one hand, the prediction model can predict the change trend of urban land surface temperature, and on the other hand, it can provide theoretical basis for formulating measures to prevent and mitigate the aggravation of heat island effect.

**Keywords:** heat island effect; the surface temperature; spatial variation analysis; factor analysis; prediction model