

城市建成区平面形态与城市热环境关联性研究 ——以西安市为例

于汉学, 李弘颖

(长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 随着我国城市化进程的快速发展, 建设用地扩张引发的城市下垫面属性变化对城市热环境产生了日益严重的负面影响. 以探究城市建成区平面形态与城市热环境的相关关系为研究目标, 以西安市城六区为研究对象, 基于 Landsat 遥感影像提取 2002—2021 年间的城市建成区边界并得出其平面形态的量化参数, 同时通过地表温度反演计算出对应年份地表温度的各项指标, 而后对两者进行相关性分析, 结果表明地表温度最大值与建成区平面形态的面积、周长具有高显著性的相关关系, 最终分别对两组数据通过曲线拟合建立数学模型并得出其具体的函数方程, 为城市热环境的优化设计提供参考.

关键词: 建成区平面形态; 城市热环境; 地表温度; 单窗算法

中图分类号: TU984.113

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0882-08

The relationship between the plane form of urban built-up area and urban thermal environment: A case study of Xi'an city

YU Hanxue, LI Hongying

(School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization in China, the changes of urban subsurface properties caused by the expansion of construction land have increasingly serious negative impacts on the urban thermal environment. This paper aims to investigate the correlation between built-up area morphology and urban thermal environment, and takes the six districts of Xi'an City as the research object, extracts the boundaries of the built-up area from 2002-2021 based on Landsat remote sensing images and derives the quantitative parameters of its morphology, and at the same time, calculates the indicators of the corresponding year's surface temperature through the inversion of the surface temperature, and then conducts the correlation analysis between the two. The results show that the maximum value of surface temperature has a highly significant correlation with the area and perimeter of the built-up area, and the mathematical model is established by curve fitting for the two groups of data and the specific functional equations are derived, which can be used as a reference for the optimal design of the urban thermal environment.

Key words: built-up area plane form; urban thermal environment; surface temperature; mono-window algorithm

随着城镇化建设的发展, 城市快速扩张导致建成区形态不断演变, 自然地表类型快速转变为建设用地使得城市热环境持续恶化^[1]. 随之而来的城市热岛效应对城市人居环境产生的负面影响日益严重, 因此, 对于建成区形态发展与城市热环境之间相关性的研究对以降低热岛效应为目的的城市设计方法有重要意义^[2-5].

城市热环境研究起源于 19 世纪初期的英国^[6-8], 此后, 国内外学者对城市热环境的演变过

程、影响因素等做出了诸多研究^[9-11]. 如 Leonard 等^[12]基于 Landsat TM/ETM+ 和 Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像, 比较里约 1984—1999 年和 2000—2015 年的平均地表温度复合数据来评估地表温度的时间演变; SriVastaVa 等^[13]通过遥感监测的方法探究了不同地物类型对印度城市热环境的影响. 城市建成区形态作为城市热环境影响因素之一, 目前, 对其研究主要集中在分析土地利用率和城市形态要素的变化上, 如 Aslan 等^[14]利

收稿日期: 2022-11-08

修回日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678058)

第一作者: 于汉学(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑设计及其理论方面的研究. E-mail: yu8069@chd.edu.cn

通信作者: 李弘颖(1996—), 女, 硕士生, 主要从事建筑设计及其理论方面的研究. E-mail: 870991811@qq.com

用 MODIS/Terra LST 和发射率数据对安塔利亚中部地区的地表温度与土地利用/覆被类型之间的关系进行研究;屈益挺等^[15]利用 DMSP/OLS 数据和 MODIS 地表温度产品分析了北京市 2000~2012 年的城市建设用地扩张情况和地表温度变化;季崇萍等^[16]对北京城市化进程对城市热岛的影响进行了研究;祝新明等^[17]以西安市建成区为研究范围,分别对 2005、2010 和 2016 年的 Landsat 数据进行地表温度反演,研究建成区变化对热岛空间分异性的影响。

以上研究主要以城市热环境变化趋势和影响机制为主,而对二者之间的定量关系描述相对较少。因此,本文以西安市城六区为研究对象,主要对建成区平面形态的各个要素与城市热环境的相关性以及定量关系进行研究。在城市平面形态要素的选择上,除采用几何参数来定量描述城市平面形态之外,还引入分形理论的分形维数以揭示复杂城市空间形态的演变规律^[18-19]。使用城市地表温度值以量化城市热环境,并对两组量化数据进行相关性分析,最终得出建成区平面形态与城市热环境定量关系的数学函数公式,以期对未来的城市空间发展策略与城市设计方法研究提供一定的参考与借鉴价值。

1 建成区平面形态与城市热环境

1.1 建成区平面形态

城市建成区是指城市市区连片集中及分散在近郊与城市有密切联系、具有基本完善市政公用设施的城市建设用地。建成区标志着城市不同发展时期建设用地的状况,对其进行定量描述是研究城市扩展的重要内容,也是研究城市扩展变化的关键^[20]。因此,对研究年份建成区边界进行提取,以进一步对建成区平面形态的各个要素进行定量描述。

1.2 热岛效应、城市热环境及地表温度

城市热岛效应是指快速城市化和工业化过程中导致城市温度高于周边郊区或乡村等非城市环境的一种温度差异性现象。而城市热环境是在热岛效应的基础上发展起来的概念,是指与热有关的、且能够影响人体舒适度的物理环境。城市热岛效应的产生是城市化过程中改变城市热环境的体现,二者均可以用地表温度(Land Surface Temperature, LST)进行衡量^[21-23]。因此,通过对研究年份的城市地表温度进行计算来对城市热环境定量描述。

1.3 城市形态变化与热环境的影响关系

由于城市的快速扩张引起区域下垫面性质发

生显著变化,地表自然状态逐渐被不透水表面所取代,使得城市地表热特性发生改变。城市形态变化是引起城市热环境改变、城市热岛效应加剧的重要原因。因此,对两者之间的关联性进行研究对改善城市热环境、建设更合理的城市格局有重要意义。城市形态可细分为空间形态与平面形态,本文重点分析平面形态与城市热环境之间的关系。

2 建成区平面形态量化过程

2.1 研究区概况

西安市地处陕西省关中平原,地理坐标位于 33.42~34.45°N 和 107.40~109.49°E 之间,市域面积为 10 096.81 km²。受全球气候变暖、城市热岛效应的综合影响,西安市夏季极端天气频发^[24]。据西安市统计局统计数据,至 2016 年底,西安市市区人口达 714.41 万人,建成区面积较 2004 年扩张约 200 多平方公里,年平均气温上升约 0.9℃,城市热环境状况恶化严重,因主城区是近年来城市建设用地变化最为迅速的区域,因此本文选取西安市主城区作为研究对象。包括雁塔区、碑林区、莲湖区、新城区、未央区及灞桥区(见图 1)。

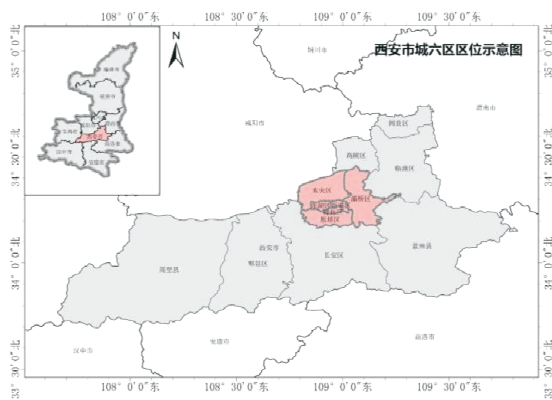


图 1 西安市城六区区位示意图

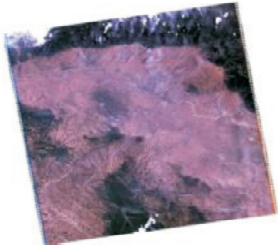
Fig. 1 Xi'an City six district map

2.2 数据获取方法

本文用于进行城市建成区边界提取及地表温度反演的数据均来源于 Landsat 遥感影像,影像数据从美国地质调查局官网(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)获得。考虑到西安市的地理区位,为得到更具有代表性的地表温度数据,以夏季即 6—8 月的研究区域内无云覆盖的影像为筛选原则,选取符合上述要求的年份即 2002、2003、2004、2005、2006、2008、2009、2010、2011、2013、2014、2015、2016、2019、2021 年这十五个年份的夏季影像为研究对象进行分析(见表 1)。

表1 数据来源

Tab. 1 The data source

获取遥感影像卫星	研究年份/年	原始遥感图像示例
Landsat 5 TM (band6)	2002、2003、2004、2005、2009、2010	
Landsat 7 ETM+ (band6)	2006、2008、2011	
Landsat 8 TIRS (band10)	2013、2014、2015、2016、2019、2021	

(以2005年获取Landsat 5 TM遥感影像为例)

2.3 城市建成区边界提取

通过对遥感影像数据上地物所呈现的光谱信息及纹理规则等来识别建成区的边界范围^[25]. 在ENVI5.3软件中分别对各年份遥感影像进行几何校正及波段融合等预处理后,导出图像,通过ArcGIS软件在遥感影像上结合目视判读法勾勒出建成区的矢量边界用于后续参数计算(见图2).

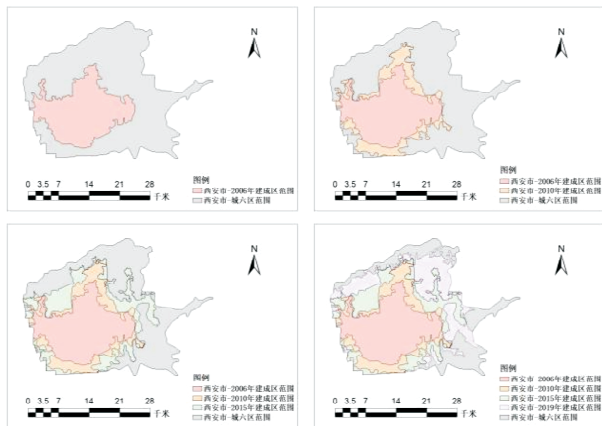


图2 西安市城六区建成区发展典型年份示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a typical year of built-up area development in the six districts of Xi'an city

2.4 城市建成区平面形态定量参数

选取定量描述建成区平面形态的常用几何形态定量参数包括面积、周长、紧凑度指数、形状指数、圆形度^[19];分形形态定量参数包括边界维数、网格维数来对西安市城六区的扩张过程进行定量描述^[26].各参数说明如下:

(1)面积(A)

通过ArcGIS软件对提取的建成区矢量边界自动计算得出面积数据(A).

(2)周长(P)

通过ArcGIS软件对提取的建成区矢量边界自动计算得出周长数据(P).

(3)紧凑度指数(BCI)

紧凑度常用来反映区域形状的特征,当平面形状不同时,相同的投影面积往往也能反映出不同的空间紧凑度,其公式如下^[19].

$$BCI = 2 \sqrt{\pi A} / P \quad (1)$$

式中: A 为建成区的面积, km²; P 为建成区的周长, km.

(4)形状指数(LSI)

形状指数是一种测度指数,用来表现某一几何图形与标准的圆或正方形的差异程度,将其与标准圆或正方形的差异量化出来.其公式如下^[19].

$$LSI = P / 2 \sqrt{\pi A} \quad (2)$$

式中: 参数含义同前.

(5)圆形度(e)

圆形度是形状数中最为广泛使用的指标,将图形周长与等面积圆的周长进行比较,用来表述图形接近圆形的程度,即“形状偏离度”.其公式如下^[19].

$$e = (4\pi A) / P^2 \quad (3)$$

式中: 参数含义同前.

(6)边界维数(D)

城市边界维数模型主要用来反映城市用地边界的复杂弯曲水平.在对城市外部几何形状特征的研究中,一般选取周长—面积的关系进行计算.其公式如下^[26].

$$\ln P = \ln \varphi + f(D) \ln A \quad (4)$$

式中: φ 为常数.可知 $f(D) = D/2$, 即 $\ln A$ 与 $\ln P$ 的线性回归斜率,即边界维数 $D = 2K$.

(7)网格维数

城市网格维数模型主要用来反映建设用地空间分布的均衡程度.将建成区矢量边界图导入ImageJ图像处理软件中可对城市平面形态网格维数进行自动测量,得到网格维数数据.

通过以上公式可测量、计算得出城市建成区平面形态7个相关参数见表2.

表 2 西安市城六区建成区平面形态参数

Tab. 2 Planform parameters of built-up areas in six districts of Xi'an City

年份/年	面积/km ²	周长/km	紧凑度指数	形状指数	圆弧度	边界维数	网格维数
2002	176.67	63.60	0.764	5.236	0.58	1.586	1.131
2003	194.50	71.84	0.710	5.637	0.50	1.603	1.222
2004	211.37	75.70	0.702	5.698	0.49	1.598	1.212
2005	221.76	69.56	0.783	5.111	0.61	1.553	1.202
2006	249.15	77.04	0.749	5.341	0.56	1.557	1.207
2008	272.56	78.09	0.773	5.176	0.60	1.537	1.210
2009	282.93	85.09	0.723	5.536	0.52	1.557	1.227
2010	314.74	89.65	0.723	5.530	0.52	1.547	1.217
2011	329.82	90.88	0.730	5.476	0.53	1.539	1.229
2013	339.26	94.51	0.712	5.615	0.51	1.545	1.216
2014	424.87	108.32	0.696	5.751	0.48	1.533	1.226
2015	437.59	120.56	0.634	6.307	0.40	1.560	1.251
2016	538.88	140.81	0.603	6.638	0.36	1.558	1.214
2019	620.12	183.05	0.497	8.044	0.25	1.605	1.196
2021	722.27	200.60	0.490	8.168	0.24	1.596	1.182

3 城市热环境量化过程

本节利用遥感影像, 在 ENVI5.3 软件中通过覃志豪^[27-28]单窗算法进行地表温度反演, 以地表温度值来定量描述西安市城六区城市热环境。

3.1 数据处理

由于受到光谱分辨率、空间、时间、远程感测系统上辐射等的影响, 遥感系统在数据采集过程中难免出现误差从而降低数据的质量, 对影像进行预处理以保证后续研究的准确性。采取的预处理主要有: 辐射定标、图像裁剪、大气校正等(见图 3):

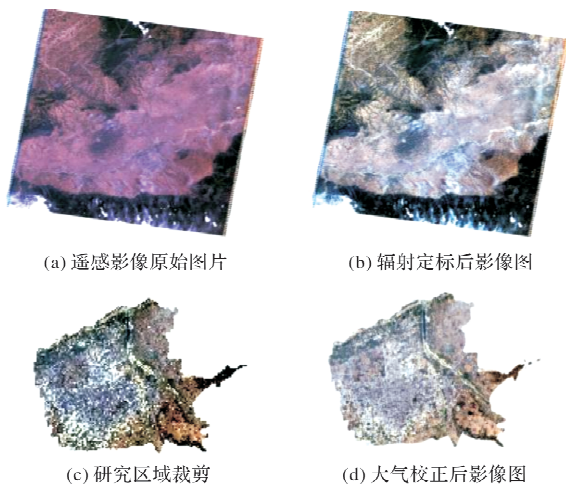


图 3 2005 年遥感影像预处理过程

Fig. 3 Preprocessing of remote sensing imagery in 2005 process

3.2 地表温度反演

覃志豪^[29]通过引进大气平均温度的概念提出根据 TM6 获取地表温度的单窗算法。该算法反演地表温度的精度应小于 1.5℃, 当有实测大气探空

数据时, 误差可减小到 0.9K^[30]。以下为地表温度反演相关公式:

(1) 辐射亮温计算

辐射亮温计算过程中关键在于采用软件对热红外波段进行辐射定标, 即将 DN 值转换成所对应的辐射强度值进而求出相应的辐射亮温值公式为:

$$T_b = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1) \quad (5)$$

式中: T_b 是相应波段辐射亮温值, K_1 、 K_2 是卫星发射前的预设常量, 取值见表 3, L_λ 是辐射亮度值。

表 3 预设常量值

Tab. 3 The data source

Landsat	$(K_1 \cdot W^{-1}) / (cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$	K_2 / K
Landsat 5	607.76	1 260.56
Landsat 7	666.09	1 282.71
Landsat 8	774.89	1 321.08

(2) 地表比辐射率计算

首先利用图像的红光波段和近红外波段的比值来对归一化植被指数(NDVI)进行计算。公式为

$$NDVI = \rho_{(NIR)} - \rho_{(RED)} / \rho_{(NIR)} + \rho_{(RED)} \quad (6)$$

再根据 NDVI 计算植被覆盖度 f , 公式为

$$f = NDVI - NDVI_{(soil)} / NDVI_{(veg)} - NDVI_{(soil)} \quad (7)$$

式中: $NDVI$ 是归一化植被指数, 根据经验值, 选取 $NDVI_{(soil)} = 0.05$, $NDVI_{(veg)} = 0.7$ 来进行植被覆盖度的近似估计。

从卫星像元的尺度来看, 可以大体将地表结构分为水面、城镇和自然表面^[31]。地表比辐射率估计运算的公式为

$$\epsilon = f\epsilon_v + (1-f)\epsilon_i + d\epsilon \quad (8)$$

式中: ϵ_v 代表植被的比辐射率, 一般取 0.985; ϵ_i

代表裸露地表的比辐射率,一般取值为 0.960. f 是植被覆盖度, $d\epsilon$ 表示地表几何分布和内散射效应, $d\epsilon=0.06\times f\times(1-f)^{[31]}$.

(3)大气平均作用温度获取^[29]

$$T_a=16.011\ 0+0.926\ 21\times T_0 \quad (9)$$

式中: T_a 为大气平均作用温度, K, T_0 是遥感图像获取时当地的气温, K.

(4)大气透射率获取

大气透射率通过在大气校正参数计算器网址 (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 中输入相关信息获取.

(5)地表温度计算

地表温度反演的原理公式如下^[27-28].

$$T_s=[a\times(1-C-D)+(b\times(1-C-D)+C+D)\times T_b-D\times T_a]/C \quad (10)$$

式中: T_s 为地表真实温度; a 、 b 为常量, $a=-67.355\ 351$, $b=0.458\ 606$; C 、 D 为中间变量; T_a 为大气平均作用温度, K, T_b 可用普朗克公式的反函数获取.

$$C=\epsilon\times t \quad (11)$$

$$D=(1-t)\times(1+(1-\epsilon)\times t) \quad (12)$$

式中: ϵ 表示地表比辐射率; t 为当天大气的透射率.

分别将所选年份遥感影像图带入以上步骤通过计算可得出城市地表温度值, 相关参数见表 4. 地表温度反演图见图 4.

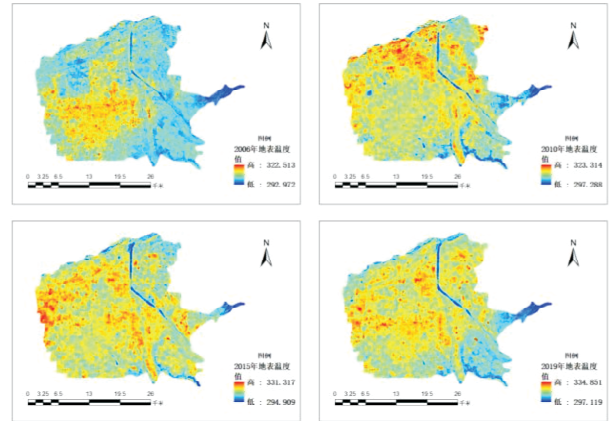


图 4 西安市城六区地表温度典型年份示意图

Fig. 4 Schematic diagram of typical years of surface temperature in six districts of Xi'an City

表 4 地表温度相关参数

Tab. 4 Land surface temperature related parameters

年份/年	地表温度/K				
	最小值	最大值	平均值	方差值	标准差值
2002	297.969	320.208	309.089	123.643	11.120
2003	296.741	318.475	307.608	118.092	10.867
2004	293.431	314.288	303.860	108.754	10.429
2005	298.392	323.961	311.177	163.443	12.785
2006	292.972	322.513	307.743	218.168	14.771
2008	292.219	320.5	306.360	199.954	14.141
2009	297.607	323.013	310.310	161.366	12.703
2010	297.288	323.314	310.301	169.338	13.013
2011	297.196	325.453	311.325	199.615	14.129
2013	299.04	323.548	311.294	150.161	12.254
2014	293.811	327.829	310.820	289.306	17.009
2015	294.909	331.317	313.113	331.386	18.204
2016	301.41	330.918	316.164	217.681	14.754
2019	297.119	334.851	315.985	355.926	18.866
2021	296.949	329.015	312.982	257.057	16.033

4 相关性分析

在 SPSS 软件中采用皮尔逊相关系数对地表温度定量参数与建成区平面形态定量指标进行了相关性分析, 相关性详情见表 5 所示.

对所得数据进行分析可知: 城市建成区的面积、周长分别与地表温度最大值、平均值、方差值与标准差值具有显著的相关关系; 城市建成区

的紧凑度指数、形状指数、圆形度分别与地表温度最大值、平均值、方差值具有显著的相关关系.

因皮尔逊相关性大于 0.5 (越大表示越相关) 并且双尾小于 0.01 说明是高度相关显著性. 可知地表温度最大值与城市建成区面积、周长的相关性更为显著, 相关系数分别为 0.836、0.792, 显著性分别为 0.000、0.000.

表 5 西安市城六区地表温度值与平面形态参数值相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis between surface temperature values and planform parameter values in six districts of Xi'an city

		LST 最小值	LST 最大值	LST 平均值	LST 方差值	LST 标准 差值	建成区 面积	建成区 周长	建成区 边界 维数	建成区 网格 维数	建成区 紧凑度 指数	建成区 形状 指数	建成区 圆形态
LST 相关性	皮尔逊	1	.327	.643**	-.156	-.146	.236	.225	.077	-.188	-.226	.211	-.230
	最小值Sig. (双尾)		.234	.010	.579	.604	.398	.420	.786	.502	.418	.449	.409
	个案数	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
LST 相关性	皮尔逊	.327	1	.934**	.879**	.887**	.836**	.792**	-.067	.160	-.713**	.700**	-.713**
	最大值Sig. (双尾)	.234		.000	.000	.000	.000	.000	.813	.569	.003	.004	.003
	个案数	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
LST 相关性	皮尔逊	.643**	.934**	1	.654**	.664**	.766**	.727**	-.025	.059	-.663**	.648**	-.665**
	平均值Sig. (双尾)	.010	.000		.008	.007	.001	.002	.929	.835	.007	.009	.007
	个案数	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
LST 相关性	皮尔逊	-.156	.879**	.654**	1	.996**	.753**	.723**	-.045	.248	-.657**	.649**	-.655**
	方差值Sig. (双尾)	.579	.000	.008		.000	.001	.002	.873	.373	.008	.009	.008
	个案数	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
LST 标准 差值	皮尔逊	-.146	.887**	.664**	.996**	1	.760**	.720**	-.107	.259	-.636*	.630*	-.634*
	Sig. (双尾)	.604	.000	.007	.000		.001	.002	.703	.351	.011	.012	.011
	个案数	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

* *. 在 0.01 级别(双尾)，相关性显著；*. 在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。

5 建立量化模型

根据上文可知，地表温度最大值与城市建成区面积、周长相关性更高。因此分别将建成区面积、周长作为模型的自变量，在 SPSS 软件中对其与地表温度最大值进行曲线拟合，选择最佳拟合曲线作为子模型。

5.1 建成区面积与地表温度最大值定量模型

SPSS 软件可对多个拟合出来的曲线进行参数估计，并显示“模型拟合度”及“显著性水平”等统计量。对比各参数结果，得到效果最佳的拟合曲线为幂函数曲线。其“模型拟合度”为 0.755，高于 0.5，说明“地表温度最大值”的情况都可以用该模型解释，拟合度相对较高。“显著性水平”显示为 0.000 小于显著性水平 0.05，拒绝模型整体不显著的假设，证明模型整体是显著的，该模型成立，见表 6。

通过结果检验可知，幂函数曲线自变量与因变量之间为正相关关系，见图 5。随着城市建成区面积的增大，地表温度的最大值也呈现增大趋势。以城市建成区面积为其自变量，Y 为地表温度最大值为因变量，函数关系式为

$$Y=266.928X_a^{0.034} \quad (13)$$

式中： X_a 为城市建成区面积， km^2 ；Y 为地表温度平均值，K。

表 6 幂函数模型参数

Tab. 6 Power function model parameters

模型摘要			
R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错误
.869	.755	.736	.009

自变量为建成区面积。

ANOVA					
	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	.003	1	.003	40.014	.000
残差	.001	13	.000		
总计	.004	14			

自变量为建成区面积。

系数				
	未标准化系数	标准化系数	t	显著性
	B	标准 错误	Beta	
ln(建成区面积)	.034	.005	.869	6.326 .000
(常量)	266.811	8.287		32.198 .000

因变量为 $\ln(LST \text{ 最大值})$ 。

5.2 建成区周长与地表温度最大值定量模型

对建成区周长与地表温度最大值依据 5.1 中的

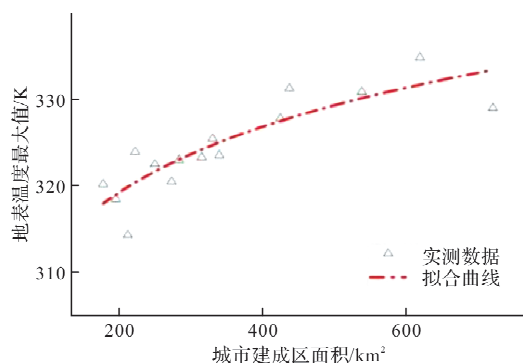


图5 地表温度最大值-建成区面积幂函数回归图

Fig. 5 Plot of power function regression of mean land surface temperature and built-up area

方法进行模型建立与验证,效果最佳的拟合曲线为S函数曲线。自变量与因变量之间为正相关关系,见图6。随着城市建成区周长的增大,地表温度的最大值也呈现增大趋势。以城市建成区周长为其自变量, Y 为地表温度最大值为因变量,函数关系式为

$$Y = 315.420$$

$$+ 19.150 \exp \{ -0.5 [(X_p - 161.288) / 53.773]^2 \} \quad (14)$$

式中: X_p 为城市建成区周长, km; Y 为地表温度平均值, K。

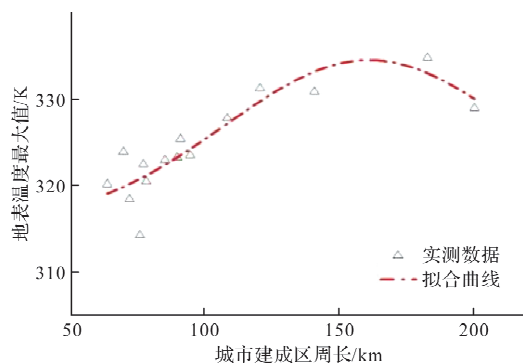


图6 地表温度最大值-建成区周长S函数回归图

Fig. 6 S-function regression of mean land surface temperature and perimeter of built-up area

6 结论

基于多源遥感数据对西安市城六区城市建成区平面形态与城市热环境的相关关系进行研究,得出以下结论:

(1) 西安市城六区的量化平面形态要素中,城市建成区的面积、周长与城市热环境的相关关系具有高显著性,其相关性系数分别为 0.836、0.792,显著性分别为 0.000、0.000;

(2) 对研究数据建立定量模型,并得出城市建成区的面积、周长数据与地表温度最大值之间的回归方程。通过本文应用的研究方法与得出的结论,以期对未来城市建成区的扩张形态设计与研究提供一定的参考价值。

参考文献 References

[1] 冯晓刚,周在辉,李凤霞,等. 西咸一体化驱动的咸阳市

热力景观格局时空分异分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 413-420.

FENG Xiaogang, ZHOU Zaihui, LI Fengxia, et al. Spatiotemporal differentiation of thermal landscape pattern in Xianyang city driven by integration of Xi'an and Xianyang[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 413-420.

[2] 金虹,王博. 城市微气候及热舒适性评价研究综述[J]. 建筑科学, 2017, 33(8): 1-8.

JIN Hong, WANG Bo. A review of evaluation studies on urban micro-climate and thermal comfort[J]. Building Science, 2017, 33(8): 1-8.

[3] 吴子豪,童滋雨. 城市形态空间格局与城市热环境关联性研究——以南京市为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2022, 45(2): 16-25.

WU Zihao, TONG Ziyu. Study on the Correlation Between the Spatial Patterns of Urban Form and the Urban Thermal Environment: a Case Study of Nanjing[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 45(2): 16-25.

[4] 祁乾龙,孟庆林,董莉莉,等. 城市规划与城市热环境研究的结合途径探讨[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(3): 46-56.

QI Qianlong, MENG Qinglin, DONG Lili, et al. Discussion on the way of combining between urban planning and thermal environment[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2021, 36(3): 46-56.

[5] 郭尚霖,孙一民. 城市设计要素对热岛效应的影响分析——广州地区案例研究[J]. 建筑学报, 2015, (10): 79-82.

WU Shanglin, SUN Yimin. An analysis of the impact of Guangzhou's urban form on heat island effect[J]. Architectural Journal, 2015, (10): 79-82.

[6] STATHOPOULOU M, CARTALIS C. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data An application to major cities in Greece[J]. Solar Energy, 2007, 81(3): 358-368.

[7] HOWARD L. Climate of London deduced from meteorological observation[M]. Harvey and Darton; 1833.

[8] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.

[9] DAVID J, SAILOR Lu. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas[J]. Atmospheric Environment, 2004, 39(3): 2737-2748.

[10] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.

ZOU Xukai, ZHANG Qiang. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6): 679-687.

[11] 冯晓刚,李萌,李凤霞,等. 耦合遥感与地面监测的陕西省热环境时空分异及其影响因素研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(3): 423-430, 458.

FENG Xiaogang, LI Meng, LI Fengxia, et al. Spatiotemporal variation and its causes of thermal environment in Shaanxi Province coupled with remote sensing and ground monitoring[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(3): 423-430, 458.

- [12] LEONARDO de Faria Peres, ANDREWS José de Lucena, OTTO Corrêa Rotunno Filho, et al. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 104-116.
- [13] SRIVASTAVA P K, MAJUMDAR T J, BHATTACHARYA A K. Surface temperature estimation in singhbhum shear zone of india using landsat-7 ETM+ thermal infrared data[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(10): 1563-1574.
- [14] ASLAN N, KOCSAN D. Analysis of relationship between urban heat island effect and land use/cover type using Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 Oli Images[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 8: 821-828.
- [15] 屈益挺,孟丹,李小娟.北京市城市扩张及其对城市增温效应的影响[J].首都师范大学学报(自然科学版), 2017,38(2):77-83.
QU Yiting, MENG Dan, LI Xiaojuan. Study on urban expansion and its influence on urban warming effect in Beijing[J]. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2017,38(2):77-83.
- [16] 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(1):69-77.
JI Chongping, LIU Weidong, XUAN Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing[J]. *Chinese J. Geophys*, 2006(1):69-77.
- [17] 祝新明,王旭红,周永芳,等.建成区扩张下的西安市热环境空间分异性[J].生态学杂志,2017,36(12):3574-3583.
ZHU Xinming, WANG Xuhong, ZHOU Yongfang, et al. Spatial variability of thermal environment in Xi'an under the build-up area expansion[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017,36(12):3574-3583.
- [18] 詹庆明,徐涛,周俊.基于分形理论和空间句法的城市形态演变研究——以福州市为例[J].华中建筑,2010,28(4):7-10.
ZHAN Qingming, XU Tao, ZHOU Jun. Research on urban morphology evolution based on fractal theory and space syntax: Taking the Fuzhou City as an example[J]. *Huazhong Architecture*, 2010,28(4):7-10.
- [19] 曲国庆,汤天军.城市平面形态的分维描述[J].淄博学院学报(自然科学与工程版),2002(1):17-19.
QU Guoqing, TANG Tianjun. Describing city shape with fractional dimension[J]. *Journal of Zibo University*, 2002(1):17-19.
- [20] 张晓东,赵银鑫,武丹,等.基于遥感的银川市建成区城市扩展及其热环境变化分析[J].干旱区地理,2020,43(5):1278-1288.
ZHANG Xiaodong, ZHAO Yinxin, WU Dan, et al. Urban built-up area expansion and thermal environment variation in Yinchuan City based on remote sensing[J]. *Arid Land Geography*, 2020,43(5):1278-1288.
- [21] 江颂,彭建,董建权,等.地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画[J].地理学报,2022,77(9):2249-2265.
JIANG Song, PENG Jian, DONG Jianquan, et al. Conceptual connotation and quantitative characterization of surface urban heat island effect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(9):2249-2265.
- [22] LAI D Y, LIU W Y, GAN T T, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 337-353.
- [23] PENG J, XIE P, LIU Y X, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [24] 杨勇,任志远.基于GIS的西安市城镇建设用地图扩展研究[J].遥感技术与应用,2009,24(1):46-51,132.
YANG Yong, REN Zhiyuan. The research of built-up land sprawl in Xi'an based on GIS technology[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(1):46-51,132.
- [25] 邓刘洋,沈占锋.城市建成区遥感影像边界提取与扩张分析[J].地球信息科学学报,2018,20(7):996-1003
DENG Liuyang, SHEN Zhanfeng. Built-up area extraction and urban expansion analysis based on remote sensing images [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(7):996-1003.
- [26] BATTY M. Exploring isovist fields: space and shape in architectural and urban morphology[J]. *Environment and Planning B: Plan-ning and Design*, 2001, 28(1): 123-150.
- [27] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等.单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J].遥感学报,2015,19(6):946-976.
HU Deyong, QIAO Kun, WANG Xingling, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015,19(6):946-976.
- [28] 王倩倩,覃志豪,王斐.基于多源遥感数据反演地表温度的单窗算法[J].地理与地理信息科学,2012,28(3):24-26,62,113.
WANG Qianqian, QIN Zhihao, WANG Fei. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature based on multi-source remote sensing data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012,28(3):24-26,62,113.
- [29] 覃志豪, WENJUAN L, MINGHUA Z, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J].国土资源遥感.2003(2):37-43.
QIN Zhihao, WENJUAN L, MINGHUA Z, et al. Estimating of the essential atmospheric parameters of mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat TM 6 [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003(2):37-43.
- [30] SOBRINO J. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,90(4):434-440.
- [31] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.利用 Landsat TM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法[J].海洋科学进展,2004,22:129-137.
QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. Estimation method of land surface emissivity for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data [J]. *Advances Inmarine Science*, 2004,22:129-137.