

引用格式:陈昭,罗小波,高阳华,等.基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析[J].地球信息科学学报,2019,21(7):1051-1060. [Chen Z, Luo X B, Gao Y H, et al. Modeling and multi-scale analysis of the spatial heterogeneity of land surface temperature in Chongqing based on Semi-Variogram[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(7):1051-1060.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180611

基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析

陈 昭¹, 罗小波^{1,2}, 高阳华^{2*}, 叶勤玉², 王书敏¹

1. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

Modeling and Multi-Scale Analysis of the Spatial Heterogeneity of Land Surface Temperature in Chongqing based on Semi-Variogram

CHEN Zhao¹, LUO Xiaobo^{1,2}, GAO Yanghua^{2*}, YE Qinyu², WANG Shumin¹

1. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China

Abstract: Analyzing the spatial heterogeneity of land surface temperature (LST) is important for understanding the spatial structure of LST. This study retrieved LST by the atmospheric correction method, and constructed a spatial heterogeneity model of LST by using the semi-variogram function. It then took a multi-scale perspective to discuss LST's spatial heterogeneity in the study area of Chongqing. A Landsat 8 OLI imagery in June 16, 2013 was the primary data source. Results show that: ① The LST's spatial heterogeneity was exponentially distributed at different spatial scales. ② At the 30 m spatial scale, the spatial heterogeneity was mainly caused by spatial structure, though the proportion of spatial variation caused by random factors accounted for 0.45, showing obvious nugget effect; thus, random factors cannot be ignored at this scale. ③ On the whole spatial scale (30~1500 m), the spatial heterogeneity was mainly caused by spatial structure, and showed obvious spatial scale effect. As the spatial scale increases, the nugget (C_0), the partial sill (C), the sill (C_0+C), and the nugget-sill ratios ($C_0/(C_0+C)$) gradually decreased, indicating that the spatial heterogeneity declined and the spatial autocorrelation gradually increased. Meanwhile, the range (A) gradually increased, indicating that spatially autocorrelated regions gradually enlarged. ④ On one hand, the proportion of spatial variation caused by random factors ranged from 0.23 to 0.46, showing obvious volatility, because the LST also had spatial heterogeneity within each pixel. On the other hand, the spatial variability caused by spatial structure was relatively flat,

收稿日期:2018-09-05;修回日期:2019-03-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(41871226);重庆市博士后特别资助项目(Xm2016081);重庆市气象局开放基金项目(KFJJ201602);重庆市应用开发计划重点项目(cstc2014yykfb30003);中国气象局省所科技创新发展专项(SS-CX201917)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41871226; Chongqing Postdoctoral Special Funding Project, No.Xm2016081; Chongqing Meteorological Bureau Open Fund Project, No.KFJJ201602; Chongqing Application Development Plan Key Project, No.cstc2014yykfb30003; China Meteorological Administration Provincial Science and Technology Innovation Development Project., No.SSCX201917.]

作者简介:陈 昭(1993-),男,湖北仙桃人,硕士生,主要从事遥感技术应用及城市热岛等研究。E-mail: 506556163@qq.com

*通讯作者:高阳华(1962-),男,重庆奉节人,正研级高级工程师,主要从事作物生态、气候资源开发及气象灾害等研究。

E-mail: gaoyanghua@sina.com

because the change of spatial scale did not affect the topographic structure. ⑤ From the scale effect perspective, both sill and nugget showed large fluctuations, and the trend was similar from 690 m to 1500 m, indicating that the change of the LST's spatial heterogeneity was related to random factors. In summary, choosing the appropriate spatial scale is very important for analyzing the spatial structure of LST. When the scale is small, the spatial distribution of LST is easily disturbed by random factors, which affects the variability in spatial structure. When the scale is large, the spatial heterogeneity of LST is weak and unstable.

Key words: land surface temperature; semi-variogram; spatial heterogeneity; spatial structure; scale effect; Chongqing

***Corresponding author:** GAO Yanghua, E-mail: gaoyanghua@sina.com

摘要:城市地表温度空间异质性的研究对理解城市地表温度空间结构有重要意义。本文利用大气校正法反演地表温度,基于半变异函数构建城市地表温度空间异质性模型,并进一步分析不同空间尺度下地表温度空间异质性结构参数的变化规律。以2013年6月16日的Landsat 8为数据源,以重庆为研究区开展实验,研究结果表明:①不同空间尺度下重庆地表温度空间异质性均呈现指数模型分布特征;②在30 m空间尺度下,地表温度空间异质性主要是由空间结构引起,但随机因素引起的空间变异占比为0.45,呈现出明显的块金效应,表明该尺度下随机因素引起的空间变异不可忽略;③从空间尺度(30~1500 m)整体变化上看,地表温度空间异质性主要由空间结构引起,同时表现出明显的尺度效应;随着空间尺度增大,块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)以及块基比($C_0/(C_0+C)$)逐渐减小,表明地表温度空间异质性逐渐减弱但空间自相关性逐渐增强。变程(A)逐渐增大,表示空间自相关性范围逐渐扩大;④随机因素引起的空间变异占比为0.23~0.46,呈现出波动变化,这是因为地表温度在像元内部也存在空间异质性。空间结构引起的空间变异相对平缓,这是因为空间尺度的变化不会改变地形结构;⑤从尺度域来看,基台值与块金值在尺度域(690 m, 1500 m)内呈现出较大幅度波动变化状态,且变化趋势相似,表明地表温度空间异质性的变化与随机因素有较大关联。综上所述,分析地表温度空间结构需要选取合适的空间尺度,尺度较小时,容易受到随机因素干扰,从而影响地表温度在空间结构上的空间变异性;尺度较大时,地表温度空间异质性较弱且变化不稳定。

关键词:地表温度;半变异函数;空间异质性;空间结构;尺度效应;重庆市

1 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)指地球表面的温度,是地表与大气相互作用以及太阳辐射等能量传输的综合反映。由于地球表面的地物类型、地形结构的多样性以及太阳辐射角度等多方面因素,导致地表温度在空间分布上呈现出非均匀性,并且部分区域地表温度过高,从而形成了“城市热岛”效应,甚至对人们的生活环境造成了诸多不便,例如疾病传播、有害物质难以扩散、局部地区自然灾害等等^[1]。因此,地表温度空间分布特征的研究对于缓解地表温度非均匀性分布带来的影响、改善人们生活环境以及合理规划城市建设有重要的意义。

许多相关学者从多个角度对城市地表温度在空间上的分布情况进行了研究,Rao等^[2]、Owen等^[3]、Carlson等^[4]、周淑贞等^[5]国内外研究人员根据遥感影像对地表温度的整体空间分布进行了分析以及动态监测;Streutker等^[6]、Kato等^[7]通过构建地表温度模型结合遥感图像对不同时间的地表温度变化

模拟分析;Zhang等^[8]、Bai等^[9]从生态学角度利用景观指数对地表温度的时空格局进行研究,结果表明地物类型斑块破碎度与地表温度的时空变化有一定的相关性;于琛等^[10]通过多元建模的方式对2005–2016年北京中心城区热岛时空格局及影响因子进行了分析,结果表明北京市高等级热力斑块面积逐步扩大,且不透水层对热岛强度分布有较大影响;侯浩然等^[11]对福州城市1994–2016年热环境在空间分布上的特征变化进行了研究,结果表明福州市高温地区不断扩大,且热岛效应明显增强;周洋等^[12]对2013年8月7日至13日南京市高温热浪的时空分布进行了研究,结果表明南京市高温热浪指数呈现先增加再降低的变化状态。上述研究对地表温度的时空分布变化以及影响因子进行了很好地描述。由于地表温度在空间分布上往往会表现出一定的非均匀性,从单个像元的角度来看,像元内的地表温度可能也存在一定的非均匀性,因此对于地表温度在空间分布上的差异性可以划分为在单个像元内的差异性,即随机性,以及像元之间的差异性,即空间结构性。因此,以上研究学者从时

空变化以及影响因子的角度研究地表温度的空间分布特征,但无法全面、准确表达地表温度空间分布的变异特征。

通过半变异函数模型可以有效解决地表温度的空间变异规律分析问题,进一步对地表温度空间异质性进行研究,该方法是以半变异函数为工具,以区域化变量理论为基础。目前在地表温度空间异质性研究方面较少,陈公德等^[13]通过半变异函数分析大、中、小3个尺度上海市的地表温度空间变异规律,结果表明上海市地表温度存在空间异质性;Tian等^[14]分析了热空气高光谱成像仪(TASI)和先进星载热辐射反射(ASTER)数据在地表温度空间异质性的区别以及空间尺度关系,结果表明两种数据下的地表温度的空间异质性有一定的差异性,且不同地物类型对地表温度空间异质性有一定的影响;Duan等^[15]分析了青藏高原1984–2013年地表温度增长速率的空间异质性,结果表明青藏高原在各个季节均存在空间异质性,其中南北方地表温度空间异质性的差异较大;陶于祥等^[16]研究了地表温度空间异质性与空间幅度大小的变化特征,结果表明不同大小区域地表温度的空间异质性不同,且该空间异质性存在各向异性特征。以上学者利用半变异函数对地表温度空间异质性进行了分析,并取得了较好的研究结果。但是地表温度在不同空间尺度下会表现出不同的空间分布特征,同时地表温度在较大空间尺度下反演会产生一定的非线性偏差,在对存在空间异质性的像元上应采用非线性模型,关键在于对LST的空间异质性进行定量化处理^[17–18]。因此需要从在不同空间尺度上对地表温度的空间异质性进行研究,同时利用非线性模型对地表温度空间异质性进行定量化描述。

本文引用生态学的半变异函数模型对城市地表温度空间变异进行定量建模,并从多空间尺度的角度对城市地表温度空间异质性的变化进行定量分析,从而探讨地表温度在不同空间尺度下的变异规律,并结合研究区域地形地貌特征更加深入地分析地表温度空间异质性随空间尺度变化的原因。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文选取重庆主城区为研究区域,位于29.37°N–29.86°N,106.25°E–106.79°E,南北跨度约54 km,东西跨度约53 km,整体面积大约2903 km²,海拔最高

838 m,最低109 m,平均284 m^[16]。该地区空间结构复杂,山脉、河流、植被及建筑交错。嘉陵江和长江贯穿于整个研究区域,在南北方向多条山脉呈带状分布,整个研究区域形成一个多层次的复杂结构,如图1所示。

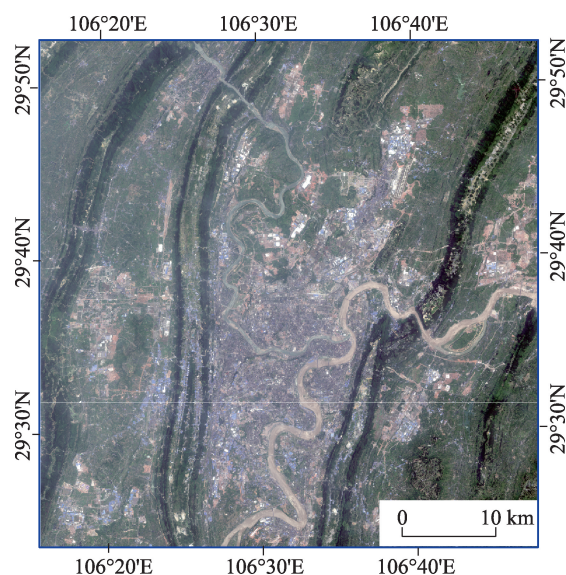


图1 2013年6月16日重庆市原始遥感影像

Fig. 1 Original remote sensing imagery for Chongqing City on June 16, 2013

2.2 数据来源

考虑到数据的可获取性以及图像数据质量等因素,同时考虑到本文的研究数据基础是地表温度,且地表温度数据需要在整个研究区域中具有差异性,因此选择重庆市2013年夏季6月地表温度较高且差异较大的时间段数据。本文采用的数据是Landsat 8影像,过境日期为2013年6月16日3时28分,无云雾干扰且成像条件较好,该数据在地理空间数据云获取(<http://www.gscloud.cn/>)。

2.3 研究方法

2.3.1 地表温度反演

本文对图像进行几何校正、辐射定标、大气校正等预处理,并基于大气校正法反演地表温度。首先将图像DN值转换成传感器端辐射亮度值,然后去除大气影响,进一步得到地表辐射亮度值^[19–20],如式(1)所示。

$$L_{\text{surface}} = \frac{L_{\text{TOA}} - L_{\text{upper}} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\text{down}}}{\tau\varepsilon} \quad (1)$$

式中: L_{surface} 是地表辐射亮度; L_{TOA} 是TOA传感器端辐射亮度; $L_{\text{upper}}/L_{\text{down}}$ 是大气上/下行辐射亮度,在NASA

官网输入所采用影像的成像时间、中心经纬度即可获取 $L_{\text{upper}}=3.48 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{down}}=5.37 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ 、 $\tau=0.61$ 三个大气参数。

同时,地表比辐射率 ε 可以通过土地覆盖类型和NDVI进行估算^[21-22],如式(2)所示。

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_x \varepsilon_x \quad (2)$$

式中: P_v 是植被覆盖度; R_v 是植被温度比; ε_v 是植被比辐射率; R_x 是裸地或者建筑的温度比; ε_x 是裸地或者建筑物的比辐射率。其中, P_v 植被覆盖度可用式(3)得到^[22]。

$$P_v = ((NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s))^2 \quad (3)$$

式中: $NDVI_v$ 表示植被的NDVI值; $NDVI_s$ 表示裸地的NDVI值。

最后,使用Planck定律将地表辐射亮度转换为LST^[23],如式(4)所示。

$$LST = \frac{K2}{\ln(1 + K1/L_{\text{surface}})} \quad (4)$$

式中: $K1$ 、 $K2$ 值可以根据相应的遥感影像元数据查询得到,对于TIRS10, $K1=774.89 \text{ (Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$, $K2=1321.08 \text{ K}$ 。

2.3.2 半变异函数及拟合模型

地表温度是区域化变量,可通过不同像元间地表温度的差异定量分析地表温度空间异质性。半变异函数是分析区域化变量空间异质性的工具之一,首先通过半变异函数计算出不同空间滞后距离下的温度差异,然后在计算出空间滞后距离对应的平均温度差异,最后统计温度差异与空间滞后距离的变化关系。因此本文采用半变异函数分析地表温度空间异质性及尺度效应,如式(5)所示^[17-18,24]。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

式中: $\gamma(h)$ 为地表温度半变异值; h 为空间滞后步距, $N(h)$ 为空间滞后步距为 h 时样本点的对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为地表温度 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的温度值。

通过式(5)可以得到离散的地表温度变异值,但只能反映出地表温度本身的变异特征和空间分布,不能反映出在不同空间滞后距离上的空间变异特征以及地表温度的空间异质性量化特征参数,因此需要通过常用半变异函数的拟合模型对离散关系进行拟合^[25]。其中常用拟合模型有指数模型、球状模型、高斯模型以及线性模型等,根据各个模型拟合决定系数(R^2)及残差(RSS)选出最佳模型。其半变异函数拟合曲线示例如图2所示。

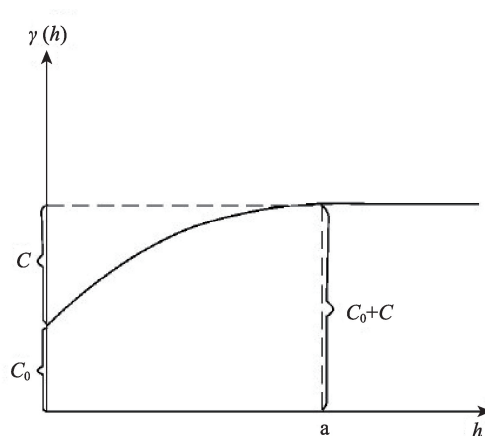


图2 半变异函数拟合曲线示例

Fig. 2 An example curve of the semi-variogram function

图2中 C_0 是块金值,表示地表温度受到随机因素影响的变异; C 是偏基台值,即半变异函数值达到稳定值的增量,表示地表温度由空间结构引起的变异; C_0+C 是基台值,表示地表温度总的空间变异; a 是变程,即半变异函数第一次达到稳定值所对应的采样距离,表示地表温度的空间自相关范围^[26-27]。

2.3.3 地表温度空间异质性尺度效应分析

由于空间尺度的变化往往会忽略或者放大地表温度在空间分布上的细节,因此在不同空间尺度下,地表温度空间异质性会表现出不同的特征。

本文通过大气校正法反演得到空间分辨率为30 m的地表温度数据后,再通过重采样得到60、90、120、…、840、…、1500 m共50个不同空间分辨率的地表温度数据。利用半变异函数和四种拟合函数模型对不同空间尺度地表温度的空间异质性建模,得到不同尺度下的最佳拟合模型以及空间异质性结构参数,最后对多尺度下地表温度空间异质性的变化特征进行分析。

3 实验结果及分析

3.1 地表温度空间异质性建模

本文通过大气校正法反演地表温度,得到2013年6月16日3时28分重庆市30 m空间分辨率下地表温度的空间分布状态,如图3所示。

由图3得知重庆地区地表温度在整体空间分布上呈现出非均匀性,而且整体差异性较大。地表温度较高的区域主要集中在中部地区、东北地区以及西南地区。这些高温区域均存在较大密集度的人口以及建筑,这是导致这些区域温度明显高于周围

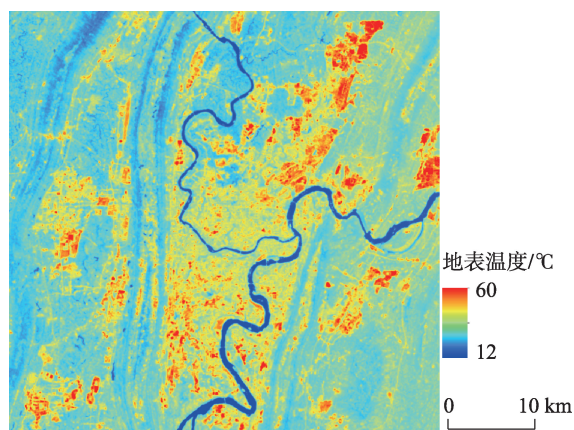


图3 2013年6月16日重庆市30 m空间分辨率的地表温度

Fig. 3 LST at the 30 m scale in Chongqing

City on June 16, 2013

区域的因素之一,因此该区域地表温度表现出一定的空间分布特征,城市地表温度在整体上呈现出带状分布。

为了从各向同性的角度定量分析该区域地表温度的空间异质性,利用半变异函数模型得到地表温度的半变异函数值与步距的离散关系,然后选取了四种常用的拟合模型对离散关系值进行拟合,分别是高斯模型、指数模型、球状模型以及线性模型,根据拟合的决定系数大小,指数模型的拟合度是最优的,拟合曲线如图4所示。

图4表示的是随着步距(h)的增大,半变异函数值的变化情况。从整体变化上来看,在一定步距(h)范围内,半变异函数值随着步距(h)的增大逐渐

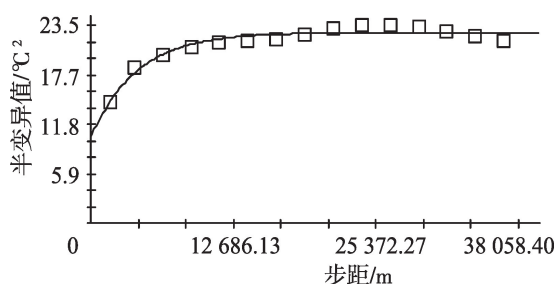


图4 30 m空间分辨率地表温度的半变异函数值的拟合曲线

Fig. 4 A fitted curve of the semi-variogram of the LST at the 30 m scale

增大,说明空间变异性逐渐增强;当 h 为0时,拟合曲线所对应的半变异值并不为0;在一定步距范围内,拟合曲线处于缓慢上升的状态,并且在步距达到一定范围后,拟合曲线处于水平状态,这是因为当像元之间的距离超过一定范围后,2个像元在空间分布上的相关性逐渐减弱甚至是不相关的。根据拟合曲线结果得到地表温度的空间异质性的定量参数,拟合曲线的表达式如式(6)所示。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 10.22 + 12.51 \left(1 - e^{-\frac{h}{12330}}\right) & (0 \leq h \leq 12330) \\ 22.73 & (h > 12330) \end{cases} \quad (6)$$

由拟合曲线结果得知,块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)、块基比($C_0/(C_0+C)$)以及变程(A)各空间异质性参数如表1所示。

通过拟合曲线以及参数列表得知,块金值为 $10.22\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,表示该区域地表温度由随机因素引起的空间变异不可忽略,且该区域地表温度的空间异质性具有显著的块金效应;偏基台值为 $12.51\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,表示该区域地表温度由空间结构引起的空间变异,该值略大于块金值;基台值为 $22.73\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,表明该区域地表温度的空间变异性较大,有显著的空间异质性特征;块基比值为0.45,即随机因素引起的空间变异占比为0.45,空间结构引起的空间变异占比为0.55,因此该地表温度的空间异质性主要是由空间结构引起的,而且随机因素引起的空间变异不可忽略;变程值为12330 m,表明该研究区域地表温度的空间自相关性范围在12330 m内。

3.2 地表温度空间异质性多尺度特征分析

为了进一步研究地表温度空间异质性与空间尺度之间的关系,在30 m的基础上通过像元聚合的方式得到多个空间尺度下地表温度的空间分布状态(30~1500 m,相邻尺度间隔30 m),其中部分空间尺度地表温度的空间分布如图5所示。

随着空间尺度的增大,整个研究区域地表温度的空间变化比较明显,甚至在大尺度下的空间分布上出现了平均地表温度增大的情况,因此地表温度的空间分布特征与空间尺度地选取有较大的关系。在一定的尺度范围内,地表温度的空间分布特

表1 空间异质性的特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of the spatial heterogeneity

空间分辨率/m	块金值 $C_0/(^{\circ}\text{C}^2)$	偏基台值 $C/(^{\circ}\text{C}^2)$	基台值 $C_0+C/(^{\circ}\text{C}^2)$	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程 A/m	决定系数 R^2	最佳模型
30	10.22	12.51	22.73	0.45	12330	0.943	指数

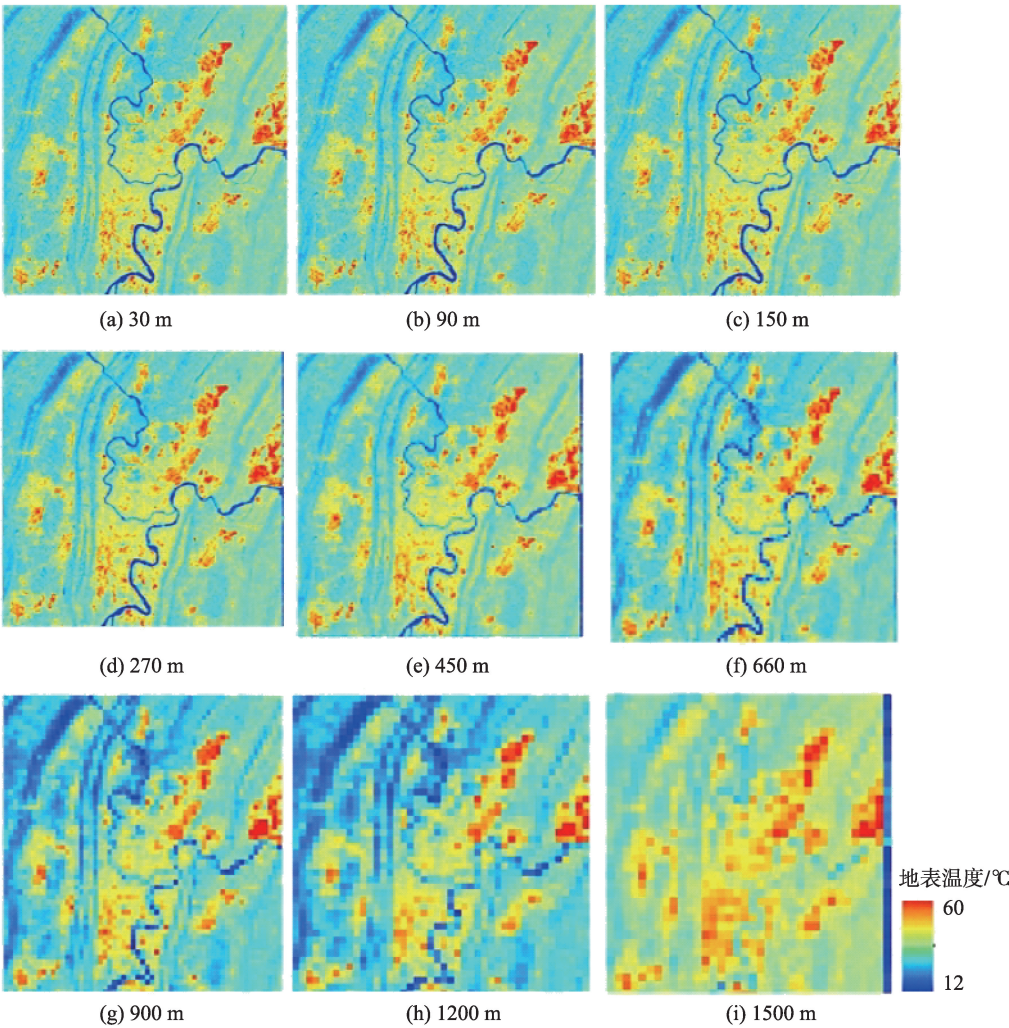


图5 2013年6月16日重庆市不同空间尺度下地表温度的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of the LST at different spatial scales in Chongqing City on June 16, 2013

征逐渐变得显著,但当尺度过大时,地表温度的空间分布特征相对模糊,这主要是由于在尺度增大的过程中会减少斑块破碎度即空间格局简单化,从而使得研究区域的地表温度更加集中在某一整块区域;当空间尺度过度增大时,则会破坏整体的空间结构,从而使得整个研究区域的地表温度值差异化减小。

通过图5得知,地表温度在不同空间尺度上的空间分布差异较大。利用半变异函数以及拟合模型得到不同空间尺度下的块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)、块基比($C_0/(C_0+C)$)以及变程(A),根据决定系数的大小,最终得到各个尺度上最佳拟合模型均是指数模型,其决定系数均在0.95左右。其中部分数据如表2所示。

根据以上不同尺度下的空间异质性定量参数,

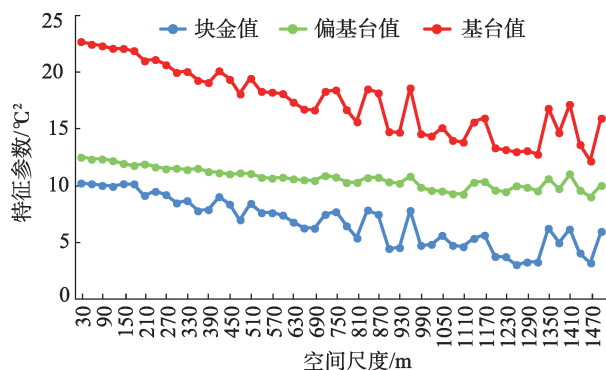
得到块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)、块基比($C_0/(C_0+C)$)以及变程(A)随着空间尺度的变化关系。其中块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)的变化状态如图6所示。

从整体变化状态看,块金值、偏基台值以及基台值均随着尺度的增大而减小,表明重庆市地表温度的空间异质性有明显的空间尺度效应。其中块金值表示地表温度由随机因素引起的空间变异,其变异范围为10.22~3.17 °C²,在尺度域(690 m, 1500 m)内,块金值表现出较大幅度的波动变化,其余尺度域内块金值变化基本上处于缓慢减小的状态,这种随机因素主要与地表温度的空间尺度、采样间距及复杂的地物类型有关。偏基台值表示地表温度由空间结构引起的空间变异,其变异范围为12.51~9.00 °C²,在整个尺度域均表现为缓慢减小的变化状

表2 不同空间尺度下的空间异质性特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of the spatial heterogeneity at different spatial scales

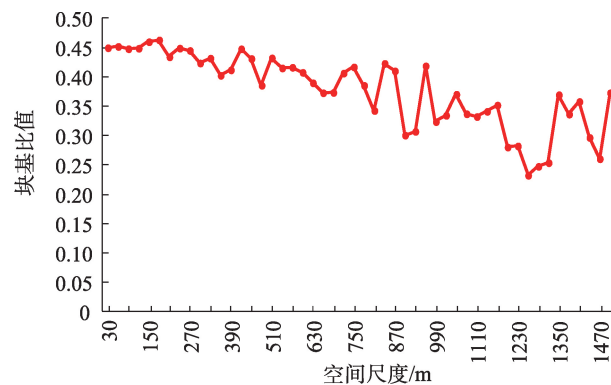
空间分辨率/m	块金值 $C_0/(^{\circ}\text{C}^2)$	偏基台值 $C/(^{\circ}\text{C}^2)$	基台值 $C_0+C/(^{\circ}\text{C}^2)$	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程 A/m	决定系数 R^2	最佳模型
30	10.22	12.51	22.73	0.450	12 330	0.943	指数
60	10.16	12.33	22.49	0.452	12 480	0.949	指数
90	10.01	12.34	22.35	0.448	12 570	0.985	指数
...
480	6.98	11.12	18.10	0.386	14 370	0.955	指数
510	8.42	11.06	19.48	0.432	18 450	0.960	指数
540	7.61	10.72	18.33	0.415	17 070	0.958	指数
...
1440	4.04	9.58	13.62	0.297	23 970	0.953	指数
1470	3.17	9.00	12.17	0.260	19 920	0.945	指数
1500	5.95	10.01	15.96	0.373	31 860	0.958	指数

图6 不同空间尺度下块金值(C_0)、偏基台值(C)、基台值(C_0+C)的变化状态Fig. 6 Changes in the nugget (C_0), the partial sill (C), and the sill (C_0+C) at different scales

态,这主要是重庆地区虽然地物类型比较复杂导致地表温度差异性较大,但是在不同尺度下整体空间分布结构的变化是比较稳定的,在从30 m升高到1500 m的空间尺度上,地表温度较高的区域(图5中黄色到红色)基本上是不变的。对比随机因素和空间结构引起的地表温度变异性,空间结构引起的变异性更为显著,同时在整个尺度的变化上空间结构引起的变异性比较稳定,基本上不受空间尺度的影响,这种变异现象可能是因为重庆地区的空间结构在空间尺度变化上并未发生畸变,因此对于重庆地区在不同空间尺度上进行地表温度空间特征分析时,其空间结构并不会造成过多的影响。基台值是块金值与偏基台值总和,表示地表温度总空间变异程度,总空间变异变化状态与块金值变化状态相似,进一步表明重庆地区在不同尺度下的地表温度

变异性变化状态更容易受到随机因素的影响,且不同空间尺度下影响程度的差异性较大,因此随机因素对地表温度空间变异的影响是不可忽略的。

另外,块基比表示地表温度由随机因素引起的空间变异占比,其中不同尺度下块基比的变化状态如图7所示。

图7 不同尺度下块基比($C_0/(C_0+C)$)的变化状态Fig. 7 Change in the nugget-sill ratios ($C_0/(C_0+C)$) at different scales

从整个尺度域上看,块基比随着尺度的增大而减小,该参数值范围在0.23~0.46之间,由此可见重庆地区地表温度的空间异质性的表现出一定的块金效应。在尺度域(30 m, 690 m)内,块基比呈现出较小幅度的波动变化,在尺度域(690 m, 1500 m)内,块基比呈现出较大幅度的波动变化。产生以上变化状态的原因在于地表温度由空间结构引起的变异比较稳定,而由随机因素引起的变异有一定的波动性,再对比图6中块金值与偏基台值的变化状

态,因此块基比波动变化状态主要受到块金值的影响。进一步表明重庆地区地表温度的空间异质性的研究必须考虑到随机因素的影响,且空间尺度越小,地表温度受随机因素影响的空间变异性占比越高,因此对越小空间尺度下地表温度空间特征的分析,越容易受到随机因素的影响,反而不利于从空间结构上进行分析。

除了以上特征参数能反映空间异质性的显著关系,变程也是研究地表温度空间异质性的特征变量之一,变程的大小表示空间异质性的范围以及均匀度。其中变程随空间尺度的变化状态如图8所示。

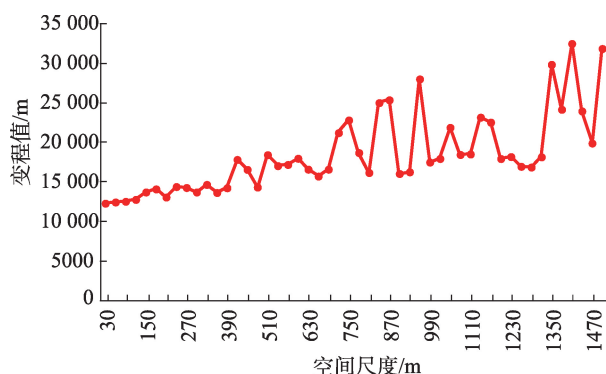


图8 不同空间尺度下变程(A)的变化状态

Fig. 8 Change in the range (A) at different scales

从整体变化上看,变程随着空间尺度的增大而增大,该范围在12 330~31 860 m之间,表明重庆地区地表温度的空间异质性范围较广,同时地表温度的空间分布更加均匀。从部分尺度域来看,变程在较小尺度域(30 m, 390 m)增长速率比较稳定,变程在中等尺度域(390 m, 690 m)有较大幅度地波动,变程在大尺度域(690 m, 1500 m)有较大幅度的波动状态。出现这种现象的原因在于不同空间尺度下的地表温度差异性较大,且不同的空间尺度下地物类型斑块破碎程度不一样,在小尺度域内地表温度的空间分布特征变化较小,在中等尺度域内地表温度的差异性变大,且不同的地物类型(植被、水体、建筑)的像元融合在一起导致在该尺度域内出现一定的波动变化,而在大尺度域内这种差异性进一步扩大。结合图5中900、1200、1500 m三种空间尺度的地表温度分布以及变程的变化图来看,900 m和1200 m空间尺度下的变程较为接近,与1500 m空间尺度下的变程差距较大,主要是因为1500 m空间尺度下地表温度的斑块破碎度也较小,即地表温度分布较为均匀。因此对于地表温度的空间异质性范围不但与空间尺度有关,还与地表温度的空间

分布均匀性有关。

综合以上几种特征参数的变化特征,在大尺度域(690 m, 1500 m)内,除了偏基台值的变化相对稳定,块金值、基台值、块基比以及变程在该尺度域内均表现出相似的不稳定性的大幅度波动变化状态。

4 讨论

从实验结果来看,本次研究区域的地表温度表现出明显的空间分布特征,且存在一定的空间异质性。通过多尺度下的空间异质性结构参数变化,表明该区域地表温度的空间异质性存在一定的尺度效应。本文从以下几个方面进一步讨论地表温度在空间分布上的特征:

不同空间尺度下的块金值(C_0)存在较大波动,最大块金值为 $10.22\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最小块金值为 $3.17\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最大差值为 $7.05\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,且随着尺度的增大而减小,说明大尺度容易忽视小尺度上的随机性和尺度效应;块金值表示随机因素引起的空间变异,这里的随机因素主要是像元内部存在空间异质性,因为每一个像元内部包含了不同的地物类型以及存在一定的温度差异,因此在像元内部的地表温度也存在一定的空间异质性。同时通过像元聚合的方式得到不同尺度下的地表温度,在像元融合的过程中,会导致一定尺度域内的相邻位置温度差异突然增大或减小,特别是地表温度差异较大的相邻区域(例如植被、建筑、水体等),这种不可控制的随机因素就会导致在部分尺度域内的地表温度的空间异质性变化出现大幅度波动状态。

结合偏基台值(C)与基台值(C_0+C)实验结果来看,在整个尺度的变化上两种参数值都比较大,说明本研究区的地表温度空间异质性比较显著。一方面基台值反映了空间变异的大小以及空间异质性的显著性,基台值越大,其空间变异越大以及空间异质性越显著。由实验结果分析可知,本次研究区域的地表温度在不同尺度下的基台值差异较大,基台值最小值为 $12.17\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最大值为 $22.73\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最大差值为 $10.56\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,由此可见,本次研究区域的地表温度空间异质性分析有较大的尺度依赖性。同时,基台值与块金值的变化状态相似,说明总的空间异质性变化容易受到随机因素的影响;另一方面偏基台值在整个尺度上的变化上均处于比较稳定的状态,最大值为 $12.51\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最小值为 $9.00\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,最大差值为 $3.51\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ 。偏基台值的大小与空间结构有关,

由于本研究区的特殊地形结构,包含了山脉、河流、植被、农田、建筑等多种不同土地覆盖类型,且不同地物类型之间相互交错导致该区域的空间结构比较复杂;同时偏基台值在尺度的变化上基本上处于比较稳定的状态,说明本次研究区域的空间结构虽然比较复杂,但是随着尺度变化,该区域由空间结构引起的地表温度空间异质性仍然比较稳定。

从块基比($C_0/(C_0+C)$)的变化状态来看,块基比随着尺度的增大而减小,表明地表温度空间自相关性逐渐增强,且块基比值的范围在0.23~0.46,因此本研究区的地表温度空间异质性主要由空间结构决定。根据空间自相关性的强弱等级划分:块基比在(0.00~0.25)范围,表示空间自相关性很强;块基比在(0.25~0.50)范围,表示空间自相关性较强;块基比在(0.50~0.75)范围,表示空间自相关性较弱;块基比在(0.75~1.00)范围,表示空间自相关性很弱,通过块基比值的范围,说明本次研究区域在不同尺度下的空间自相关性均较强。

结合空间异质性各种参数变化,发现在尺度域(690 m, 1500 m)内均出现较大幅度的波动变化,因为当空间尺度过大时,研究区域的地形地貌在空间结构上分布异常以及像元内部地表温度的空间异质性变化不稳定。在空间异质性分析当中,本次结果与陈公德等^[13]通过地表温度研究上海地区在三种尺度下的空间变异规律是相似的,其块金值、基台值、块基比同样随着尺度的增大而逐渐减小,变程随着尺度的增大而逐渐增大。但本文从50个空间尺度上对重庆地表温度的空间异质性进行了多尺度建模,同时定量探究了地表温度空间异质性的多尺度变化特征,并且发现在部分尺度域内地表温度空间异质性特征出现一定幅度的波动变化状态,因此,地表空间异质性的研究需要选取合适的空间尺度,关于确定最优空间尺度的问题将在以后的研究中进行。

5 结论与展望

通过对重庆地区地表温度空间异质性结构建模及尺度效应分析,得到以下结论:

(1) 重庆地区的地貌特征较为复杂,地表温度在整个空间分布上差异性较大,从而导致重庆地表温度表现出一定的空间异质性,并且该空间异质性受到随机因素以及空间结构共同影响,同时呈现出指数模型的分布特征。

(2) 空间尺度为30 m时,重庆地表温度由随机因素以及空间结构引起的变异分别为 $10.22\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ 和 $12.51\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,可见该地区地表温度有明显的空间异质性。这里的随机因素引起的变异主要受到采样间隔以及像元内部地表温度影响,随机因素引起的空间异质性占比为0.45,该空间尺度下由随机因素引起的空间变异不可忽略,因此在该尺度下分析地表温度的空间分布特征时容易受到随机因素的影响。

(3) 从整个空间尺度(30~1500 m)看,地表温度的空间分布均有一定的差异性,这种差异性随着空间尺度的增大更加明显,同时地表温度的空间异质性特征有一定的多尺度特征。随着空间尺度的增大,地表温度由随机因素引起的空间变异范围为 $10.22\sim 3.17\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,地表温度由空间结构引起的空间变异范围为 $12.51\sim 9.00\text{ }^{\circ}\text{C}^2$,同时地表温度的总空间变异逐渐减小,即空间异质性逐渐减弱。但从变程的整体变化上来看,地表温度的空间自相关性逐渐增强,且空间自相关性范围更大更均匀,这主要是与空间尺度以及地表温度空间分布是否均匀有关。

(4) 地表温度由空间结构引起的变异在整个尺度变化上基本上表现得比较稳定,且总空间异质性变化与随机因素有较大的关联。在尺度域(690 m, 1500 m)内,随机因素引起的空间变异以及总空间变异表现出较大幅度的波动变化特征,因此对地表温度的空间结构的分析理解需要选取合适的空间尺度,空间尺度越小,越容易受到随机因素的影响,从而忽略地表温度在空间结构上的空间异质性;空间尺度越大,地表温度空间异质性较弱且变化不够稳定。

本次研究对重庆地表温度的空间异质性进行了多尺度建模及特征分析,但由于采样尺度下的地表温度数据可能会存在一定的误差,同时可能与研究区域的选取有一定关联,因此有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Mills G. Luke Howard and the climate of London[J]. Weather, 2010,63(6):153-157.
- [2] Rao, Krishna P. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972,53(7):647-648.
- [3] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(9):1663-1681.
- [4] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use - Land

- cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. *Global and Planetary Change*, 2000,25(1):49-65.
- [5] 周淑贞, 吴林. 上海下垫面温度与城市热岛——气象卫星在城市气候研究中的应用之一[J]. *环境科学学报*, 1987,7(3):261-268. [Zhou S Z, Wu L. Surface temperature and urban heat island of Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1987,7(3):261-268.]
- [6] Streutker, David R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002,23(13):2595-2608.
- [7] Kato S, Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,99(1-2):44-54.
- [8] Zhang Y S, Balzter H, Zou C C, et al. Characterizing bi-temporal patterns of land surface temperature using landscape metrics based on sub-pixel classifications from Landsat TM/ETM+ [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2015,42:87-96.
- [9] Bai Y, Meng H, Su J H, et al. Spatial and temporal changes of urban thermal landscape pattern in Shanghai[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,36(3):196-201.
- [10] 于琛, 胡德勇, 曹诗颂, 等. 2005-2016年北京中心城区热岛时空格局及影响因子多元建模[J]. *地球信息科学学报*, 2017,19(11):1485-1494. [Yu C, Hu D Y, Cao S S, et al. Spatio-temporal pattern of heat island and multivariate modeling of impact factors of Beijing downtown from 2005 to 2016[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(11):1485-1494.]
- [11] 侯浩然, 丁凤, 黎勤生. 近20年来福州城市热环境变化遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(3):385-395. [Hou H R, Ding F, Li Q S. Remote sensing analysis of changes of urban thermal environment of Fuzhou city in China in the past 20 years[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(3):385-395.]
- [12] 周洋, 祝善友, 华俊玮, 等. 南京市高温热浪时空分布研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(11):1613-1621. [Zhou Y, Zhu S Y, Hua J W, et al. Spatio-temporal distribution of high temperature heat wave in Nanjing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(11):1613-1621.]
- [13] 陈公德, 徐建华, 戴晓燕, 等. 运用遥感数据挖掘解析城市地表温度的空间变异规律[J]. *遥感技术与应用*, 2008,23(4):405-409. [Chen G D, Xu J H, Dai X Y, et al. Applying Geo-data mining to analysis spatial variance characters of urban land surface temperature[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008,23(4):405-409.]
- [14] Tian H, Liu Q H, Du Y M, et al. Analysis of land surface temperature spatial heterogeneity using variogram model [C]// *Geoscience & Remote Sensing Symposium*. 2015.
- [15] Duan J P, Li L, Fang Y J. Seasonal spatial heterogeneity of warming rates on the Tibetan Plateau over the past 30 years[J]. *Scientific Reports*, 2015,5:11725.
- [16] 陶于祥, 许凯丰, 易宗旺, 等. 基于半变异函数的城市热岛空间异质性分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018,40(10):151-158. [Tao Y X, Xu K F, Yi Z W, et al. A semi-variogram-based analysis of spatial heterogeneity of urban heat islands[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2018,40(10):151-158.]
- [17] Garrigues S, Allard D, Baret F, et al. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,103(1):81-96.
- [18] Garrigues S, Allard D, Baret F, et al. Multivariate quantification of landscape spatial heterogeneity using variogram models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(1):216-230.
- [19] 丁凤, 徐涵秋. TM热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. *地球信息科学学报*, 2006,8(3):125-130, 135. [Ding F, Xu H Q. Comparison of two new algorithms for retrieving land surface temperature from Landsat TM thermal band[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2006,8(3):125-130, 135.]
- [20] Weng Q H, Lu D S, 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.
- [21] Li J X, Song C, Cao L, et al. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(12):3249-3263.
- [22] Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. *Remote Sens. Land Resour*, 2004,3:28-32.
- [23] Luo X B, Li W S. Scale effect analysis of the relationships between urban heat island and impact factors: case study in Chongqing[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014,8(6):284-292.
- [24] Curran P J, Atkinson P M. Geostatistics and remote sensing[J]. *Progress in Physical Geography*, 1998,22(1):61-78.
- [25] Johnston K, Hoef J V, Krivoruchko K et al. Using arcgis geostatistical Analyst[M]. ESRI Press, 2001.
- [26] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [Zhang R D. Spatial variability theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [27] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. [Wang Z Q. Application of geostatistics in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999.]