

DOI: 10.5846/stxb201812032632

杨俊, 白世豪, 金翠, 乔莹莹. 热环境视角下的最小生态安全距离——以大连北三市为例. 生态学报, 2019, 39(18): - .

Yang J, Bai S H, Jin C, Qiao Y Y. The minimum distance for ecological security from perspective of the thermal environment: the case of three northern districts of Dalian. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

热环境视角下的最小生态安全距离 ——以大连北三市为例

杨 俊^{1,2}, 白世豪¹, 金 翠^{1,*}, 乔莹莹^{1,3}

1 辽宁师范大学 人居环境研究中心, 大连 116029

2 东北大学 江河建筑学院, 沈阳 110169

3 辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

摘要:随着 2014 年国家环保部首次提出了“最小生态安全距离”的概念, 城市内部与城市间的生态安全逐渐受到社会重视, 而且基于热环境的最小生态安全距离也逐渐成为人们关注的焦点。本文基于热环境视角下最小生态安全距离的实质内涵, 结合遥感影像、行政边界、建成区边界, 利用高斯混合模型及热岛信号函数, 对 2013 年至 2016 年大连市北三市的热岛面积及最小生态安全距离进行测算。研究表明, 2013 年至 2016 年间, 大连市北三市的城市热岛总面积已由 694.10 km² 扩张到 1864.30 km²。同时, 普兰店市与瓦房店市之间的最小生态安全距离由 8.70 km 衰减至 -3.10 km, 热环境出现叠加情况, 相对危险。而普兰店市与庄河市之间的最小生态安全距离, 由 73.47 km 衰减至 58.24 km, 热环境未出现叠加情况, 相对安全。总体上呈现出城市热岛面积逐渐扩张趋势, 城市间最小生态安全距离逐渐衰减的趋势。

关键词:最小生态安全距离; 高斯混合模型; 热岛信号函数; 地表温度反演; 聚类分析

The minimum distance for ecological security from perspective of the thermal environment: the case of three northern districts of Dalian

YANG Jun^{1,2}, BAI Shihao¹, JIN Cui^{1,*}, QIAO Yingying³

1 Human Settlements Research Center, Liaoning Normal University, Dalian, 116029, China

2 Jangho Architecture College, Northeastern University, Shenyang, 110169, China

3 Research Center for Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: With the concept of “the minimum distance for ecological security” first proposed by The Ministry of Environmental Protection in 2014, the ecological safety within and between cities has been paid increasing attention to by society, while the minimum distance for ecological security based on the thermal environment has gradually become the focus of people's attention. Based on the essential connotation of the minimum distance for ecological security from the perspective of thermal environment, combined with remote sensing image, administrative boundaries, and the boundaries of built-up areas, this paper uses the Gaussian mixture model and heat island signal function to calculate the area of the heat island and the minimum distance for ecological security in the three northern districts of Dalian from 2013 to 2014. The research shows that the total area of the urban heat island in the three northern districts of Dalian has expanded from 694.10 km² to 1864.30 km². At the same time, the minimum distance for ecological security between Pulandian and Wafangdian decreased from 8.70 km to -3.10 km, resulting in the superposition of thermal environment, which was relatively

基金项目:国家自然科学基金项目(41771178, 41471140, 41801340); 国家自然科学基金重点项目(41630749); 辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2017017)

收稿日期: 2018-12-03; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cuijin@lnnu.edu.cn

dangerous. However, the minimum distance for ecological security between Pulandian and Zhuanghe decreased from 73.47 km to 58.24 km, and the thermal environment did not appear to undergo superposition, which was relatively safe. Overall, the urban heat island area gradually expanded, and the minimum distance for ecological security between cities gradually decreased.

Key Words: Minimum distance for ecological security; Gaussian mixture model; Heat island signal function; Surface temperature inversion; Clustering analysis

2014年3月国家环保部在全国环境保护工作会议中首次提出“最小生态安全距离(Minimum Distance Forecological Security, MDES)”概念。最小生态安全距离,主要是为了保障城市内部及城市间的生态安全,并满足生态系统正常运转以及环境污染稀释扩散的需要^[1]。这是我国城镇化进程中治理城市间复合污染问题的全新思路,包含了生态保护、安全底线、资源承载力和环境容量的综合性概念。城市热环境作为城市生态系统的重要组成部分,随着城市化进程的加快,城市人口的快速增加,城市建筑密度的大幅提升,人们开始逐渐关注由城市热岛效应带来的一系列负面影响。目前城市热环境不仅影响着城市气候,还影响着城市化进程和生态环境的良性发展。而基于热环境的城市群最小生态安全距离是为防范城市群热环境风险和保障人类宜居环境,要求城市间承载人类经济社会活动的城市用地间隔一定的距离作为生态缓冲带,以最大限度地发挥生态用地降温效益,从而消解城市间热环境叠加污染。

国内外学者已对城市规模和内部结构影响城市热环境的机理、城市热环境自身空间特征展开了大量理论和实证研究,对城市热环境风险防范也展开了探索性研究。其中,城市规模显著影响城市热岛强度已在世界多个城市被证实。Imhoff等^[2]分析美国38个城市热岛强度特征得出,热岛强度与城市面积呈正向线性相关关系 $\Delta T_{\text{Urban-Rural}} = 3.48 \log(\text{Area}) + 1.75$;Zhang等^[3]分析全球3000个城镇居民点热岛强度特征指出,当居民点面积大于500 km²时,热岛强度达到4.7℃,居民点面积大于10 km²并小于50 km²时,热岛强度为2.5℃;Peng等^[4]分析了全球419个城市昼夜热岛强度特征,白天城市热岛强度与城市大小呈显著的正相关关系($R^2 = 0.16$, $P = 0.003$, 56个欧洲城市),城市形态也在一定程度上影响城市热岛效应;Qiao等^[5]通过研究1989—2010年北京市建成区与热环境空间关系指出,城市热岛与城市建设用地重心转移方向基本一致,当城市规模相近,城市形态越紧凑,城市热岛效应越明显;Ke等^[6]通过WRF(Weather Research and Forecast)模拟2020年武汉都市圈不同城市扩展模式下的气候效应,增温效应在城市用地集中扩展模式下最强,城市用地分散扩展模式增温最弱;王晓云^[7]通过数值模式模拟四种500 km²理想条件下城市总体布局方案的气候特征,组团状城市布局平均温度最低,其次是十字状和带状布局,点状集中状布局平均温度最高。在城市热环境空间结构及形态研究方面;周纪等^[8]提出并构建基于高斯曲面的城市热岛容量模型充分反映了热岛信号的空间变化特征。针对单核心、空间分布基本对称的城市热岛强度分布,使用二维高斯曲面来反映城市热环境的空间形态具有一定的可操作性。查良松等^[9]利用改进的半径法对合肥市的城市热场状况进行研究,发现亮温的水平分布在城市建成区与非城市建成区间有突变现象,并以此分析城市热力场的空间分布,得到热岛强度计算公式 $I = T_B - T_1$ 。此外,学者已注意到城市热岛足迹和城市热岛容量的昼夜性、季节性差异^[10-13],以及城市热环境的区域性差异^[14-16],并通过建立热环境分区方案,指导城市各区域针对引发城市热环境的主因子进行重点调控和防治^[17-19]。通过城市不同区域之间绿化带、隔离带等的设计缓解城市热环境策略被广泛提出,城市的建筑空间形态、通风廊道、清洁空气廊道等案例也被不断运用到缓解城市热环境设计中^[20-23]。

但至今为止,国内外学术界对于“最小生态安全距离”的实质内涵还未作出明确的界定,本文基于城市生态安全格局与缓冲带等理论基础,定义热环境视角下的最小生态安全距离。量测基于热环境视角的城市间最小生态安全距离,不仅能够设置城市发展的“刚性界限”和“生态安全底线”提供理论依据,还能够为解决城市集中发展所显现出来的城市群热环境冲突和叠加等新型环境问题提供科学参考。鉴此本文通过研究分析

大连市普兰店、瓦房店、庄河三市之间的热环境叠加问题,量测城市间基于热环境应保持的最小生态安全距离,进而判断城市内部用地是否受到了其他城市热环境叠加污染。

1 研究区概况

本文以大连市的北三市,普兰店市、瓦房店市、庄河市为研究样区,北三市位于大连市北部,总面积 10370.5 km²。随着大连市经济的快速发展,瓦房店与普兰店两市之间的建成区又相距较近,之间较易产生热环境叠加问题;而普兰店与庄河两市建成区相距较远,之间不易出现热环境叠加问题,以上两种情况都对研究“热环境视角下最小生态安全距离”具有代表性意义。此外,瓦房店市西部及庄河市南部有部分岛屿,对城市内部的热岛效应不成构影响,故不予考虑。

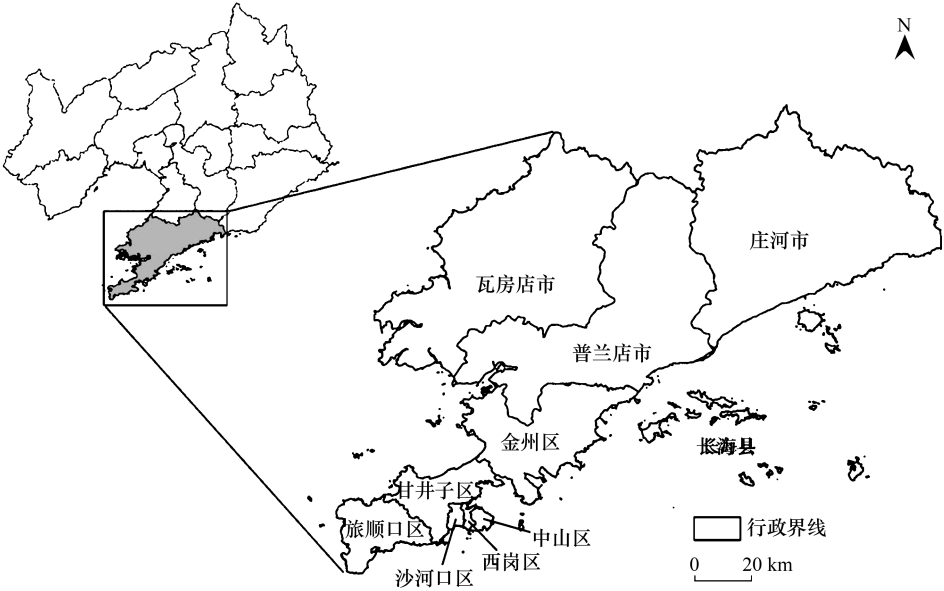


图 1 研究区概况
Fig.1 The location of study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文研究数据采用 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数据来反演城市的地表温度,城市建成区边界数据采用由中科院地理所提供的土地利用/覆被数据进行提取,城市行政边界数据由大连市规划局提供,如表 1 所示。

表 1 数据来源及说明
Table 1 Data sources and descriptions

相关参数 Related parameters	数据类型 Data type		
	Landsat8 OLI_TIRS	土地利用/覆被数据	城市行政边界
空间分辨率 Spatial resolution	30m	—	—
时间 Time	2013.8—2016.8	2013—2016	2016
数据来源 Data sources	http://www.gscloud.cn/	中科院地理所	大连市规划局

2.2 建成区边界提取

建成区主要由城市不透水面构成,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。在我国土地资源遥感调查与监测技术规程中,刘纪远等^[24]提出了基于遥

感 TM 影像的土地利用/覆盖分类系统设计原则,并在此基础上设计了完整的土地利用覆盖分类系统,将土地利用/覆盖分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级类和有林地、灌木林、疏林地、其他林地以及高、中、低覆盖度草地等 25 个二级类型。本文参照土地利用覆盖分类系统,采用中科院地理所提供的土地利用/覆被数据,选择各研究区的城市建设用地,并使用 ArcGIS 提取城市的建成区边界。

2.3 地表温度反演

由于受到大气、地形、方向等因素的干扰,亮度温度并不是地表物体辐射的真实温度,覃志豪等^[25]提出了根据地表热辐射传导方程而不需要大气校正直接反演地表温度的单窗算法来反演地表真实温度,经实地检验,其演算的精度为 0.4—1.1℃,在目前各种反演模型中是一个比较简单精度又较高的方法,故本文采用该方法进行地表温度反演(式 1),公式如下:

$$T_s = \{a_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + [b_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + C_{10} + D_{10}] T_{10} - D_{10} T_a\} / C_{10} \quad (1)$$

其中,

$$C_{10} = \tau_{10} \varepsilon_{10}, D_{10} = (1 - \tau_{10}) [1 + \tau_{10}(1 - \varepsilon_{10})]$$

式中, $a_{10} = -67.355351$, $b_{10} = 0.458606$, T_a 为大气平均作用温度, τ_{10} 为大气透射率, ε_{10} 为地表辐射率。

2.4 城市群热环境空间形态曲面模拟

究其本质,影响地表温度的因素主要有辐射总量、初始地温和地物的热惯量等^[8]。初始地温是整个地表热力系统的背景温度,地物热性质的差别是造成地物温度差异的主要原因。因此,热力系统的地表温度可以表示为(式 2):

$$T_s(x, y) = T_{s1}(x, y) + T_{s2}(x, y) \quad (2)$$

式中, (x, y) 分别为像元坐标; $T_s(x, y)$ 为地表温度; $T_{s1}(x, y)$ 为背景温度; $T_{s2}(x, y)$ 为热力系统局部热异常导致的温度增量。

当存在显著的城市热异常叠加在乡村地表温度场之上时,即出现城市热岛效应。由于乡村地表的热性质相对稳定,则其温度 $R(x, y)$ 可认为热力系统的背景温度,将城市热岛导致的温度增量 $T_{s2}(x, y)$ 定义为热岛信号函数 $UHI(x, y)$ 。因此,热力系统的地表温度可转换为(式 3):

$$T_s(x, y) = R(x, y) + UHI(x, y) \quad (3)$$

其中,

$$UHI(x, y) = a_0 \times e^{-U/2}$$

$$U = \left[\frac{(x - x_0) \cos \varphi - (y - y_0) \sin \varphi}{a_x} \right]^2 + \left[\frac{(x - x_0) \sin \varphi - (y - y_0) \cos \varphi}{a_y} \right]^2$$

式中, a_0 为高斯曲面高度,代表热岛强度; a_x , a_y 分别为高斯曲面底部椭圆的长半轴和短半轴,可以用 $UHI(x, y)$ 测量内的经度范围值和纬度范围值代替; x_0 , y_0 分别为椭圆圆心,即热岛中心; φ 为热岛方向角度^[8]。

已有的模拟城市热环境曲面的方法包括快速傅里叶变换的非参数化模型、高斯模型和支持向量机算法。高斯混合模型利用高斯概率密度函数(正态分布曲线)精确地量化学物,将一个事物分解为若干的基于高斯概率密度函数形成的模型。城市群空间扩展及其对热环境影响的动态性和背景场的不确定性会制约曲面模型精度,而高斯混合模型对于运动目标检测提取是最为成功的方法之一。因此本研究采用高斯混合模型拟合城市群热环境曲面^[26],即通过高斯混合模型(GMM),分别抽象出乡村地表温度场 $R(x, y)$ 和热岛信号函数 $UHI(x, y)$,即可拟合城市热环境曲面。其数学定义如下(式 4):

$$P(y|\theta) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \varphi(y|\theta_k) \quad (4)$$

式中, α_k 是系数, $\alpha_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$; $\varphi(y|\theta_k)$ 是高斯分布密度, $\theta_k = (\mu_k, \sigma_k^2)$, 称为第 k 个分模型。

$$\varphi(y|\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(y - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (5)$$

EM(最大期望算法)算法主要用来计算基于不完全数据的极大似然估计,它是一种迭代算法,每一次迭代都能保证似然函数值增加,并且收敛到一个局部极大值。故本文使用 EM 算法求解 GMM 参数(式 5)^[27]。

2.5 城市最小生态安全距离测算

根据城市生态安全格局与缓冲带等理论基础^[28-30],假定 A 和 B 分别为已建成和规划在建的两个相邻大型城市,且 A、B 两城市间相隔距离固定,城市功能定位、城市热环境特征明确,热岛中心均处于城市中心位置且均匀向外辐射。城市 A 的热辐射能力固定,城市 B 不定。在此条件下,根据 A、B 城市热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 和 $UHI_B(x, y)$ 衰减距离判断现有建设或规划条件下城市群热环境是否存在风险。构建数学模型如下:

设城市 A 的中心坐标 $(X_A - Y_A)$, 半径为 R_A 。图 2 中黑色圆环为城市 A 的建成区,绿色圆环表示城市 A 的热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 衰减为 0,即圆环外区域将不再受城市 A 的热辐射影响。此时,城市 A 的建成区边缘到热岛衰减缓冲带边缘的距离为 d_1 。设城市 B 的中心坐标为 $(X_B - Y_B)$, 半径为 R_B 。假设城市 B 的热环境特征存在三种情况,即城市 B 的热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 衰减为 0 时距离 B 城市建成区边缘的距离分别为 d_2 、 d_3 和 d_4 。其中,当城市 A 的热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 与城市 B 的热岛信号函数 $UHI_B(x, y)$ 同时

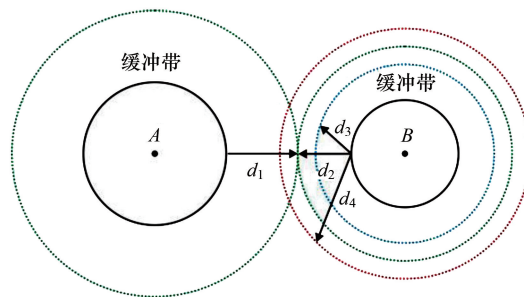


图 2 最小生态安全距离示意图

Fig.2 The sketch map of minimum distance for ecological security

衰减到 0 时,即 $UHI_A(x, y) + UHI_B(x, y) = 0$ 时,此时两城市热岛衰减缓冲带圆环相切(绿色圆环), $d_1 + d_2$ 即为城市 A 和 B 的最小生态安全距离,其中约束条件为,城市 A、B 之间的热岛信号函数叠加后的最小热岛强度不超过某一安全阈值 I (式 6)。

$$\min\{UHI_A(x, y) + UHI_B(x, y)\} < I \quad (6)$$

式中,当城市热辐射等于背景场温度时,热岛信号函数为 0,此时城市 A、B 的热环境相互不干扰,即 $I = 0$ 。

当 $d_3 < d_2$ 时(蓝色圆环),即热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 和 $UHI_B(x, y)$ 没有同时衰减到 0,两城市热岛衰减缓冲带圆环相离,说明两城市中间具有较多的生态用地足以削减两城市产生的热环境污染,两城市建设用地仍具有扩展潜力空间;当 $d_4 > d_2$ 时(红色圆环),即热岛信号函数 $UHI_A(x, y)$ 和 $UHI_B(x, y)$ 重叠,两城市热岛衰减缓冲带圆环相交,说明 A、B 两城市热环境污染叠加,已发生热环境冲突,必须通过优化生态用地空间布局改善城市热环境问题。

3 结果与分析

3.1 地表温度特征

本文采用单窗算法对 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数据进行地表温度反演,反演之后的结果数据通过 ArcGIS 建立格网来提取地表温度值,格网精度为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。结果如图 3 所示,城市建成区的地表温度高于城市郊区地表温度,呈现出明显的城市热岛效应现象,整体呈南部温度高于城市北部的趋势。2013 年至 2016 年,瓦房店市与普兰店市在 2015 年地表温度值最高,庄河市则在 2016 年时地表温度达到最高值。地表温度的增长趋势,逐渐由瓦房店市与普兰店市建成区位置,逐渐向庄河市方向蔓延。

3.2 城市群热环境空间形态曲面模拟

利用普兰店市、瓦房店市、庄河市的地表温度反演结果、高斯混合模型的聚类分析结果,同时结合热岛信号函数,分别模拟了各研究区 2013 年至 2016 年间的背景场曲面以及基于热岛信号函数建立的热环境曲面。由于比例缩放问题,图上变化不大,故本文分别给出背景场曲面图 3 幅(图 4),UHI 曲面图 3 幅(图 5)。从左至右,分别是普兰店市、瓦房店市、庄河市。其中,通过拟合的背景场曲面,普兰店市的结果精度参数如表 2 所

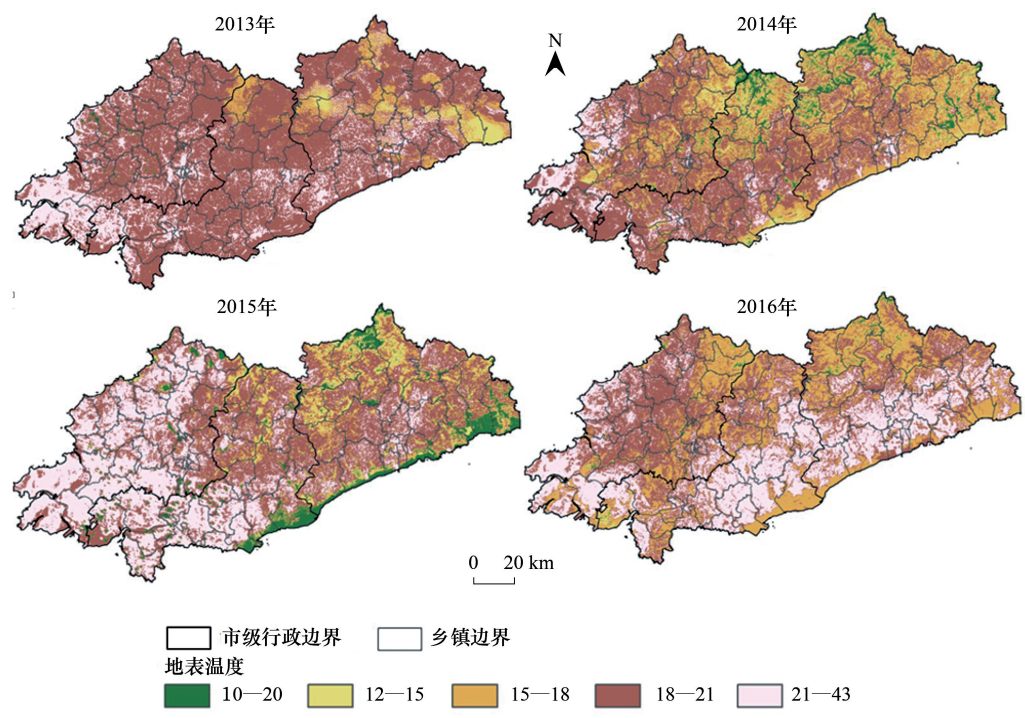


图 3 2013—2016 年北三市地表温度

Fig.3 Land surface temperature of the northern three districts during 2013—2016

示,当误差平方和 (SSE)、均方根误差 (RMSE) 越小,负相关系数 (R-Square) 越接近 1 时表明拟合的程度越好。

表 2 背景场拟合精度参数

Table 2 Fitting precision parameters for background field			
相关参数 Related parameters	普兰店市 Pulandian	瓦房店市 Wafangdian	庄河市 Zhuanghe
误差平方和 SSE	0.0339	0.0219	0.0451
均方根误差 RMSE	0.04169	0.07634	0.05197
负相关系数 R-Square	0.985	0.927	0.942

由图 4 可明显看出普兰店市与庄河市的背景温度场都在自北向南的方向上呈现温度递增的趋势,而瓦房店市的背景温度场在自东向西的方向上呈现温度递增的趋势。同时结合图 5,可以明显看出普兰店市与庄河市所产生的热岛效应都在城市的南部出现峰值,并向城市的四周进行辐射的特征,而瓦房店市所产生的热岛效应在城市的西部出现峰值,并向城市四周进行辐射的特征,且拟合所得到模型与各年份热岛方向及分布趋势相同。

3.3 城市群间最小生态安全距离测算

城市建成区与 UHI 范围线之间的部分即该城市基于热环境条件下应保持的最小生态安全距离,即通过对图上量测相邻城市间建成区边界到历年 UHI 范围线间的距离之和。本文拟合得到的热环境曲面与背景场温度的差值,即为拟合后的热岛特征值,选取热岛特征值大于 0 时的平面位置坐标,并利用 ArcGIS 对其进行矢量化,可判断出各个研究区的 UHI 辐射范围,即可求出相邻城市间的最小生态安全距离。由图 6 可知,在 2013 年至 2014,普兰店市与瓦房店市还未出现热环境叠加的情况,直至 2015 年与 2016 年时,普兰店市与瓦房店市热环境出现叠加的情况,则说明 2015 年之后普兰店市与瓦房店市之间已经超过了两座城市基于热环境应该保持最小生态安全距离,两城市之间生态环境受到了彼此城市的热环境污染。而普兰店市、庄河市在

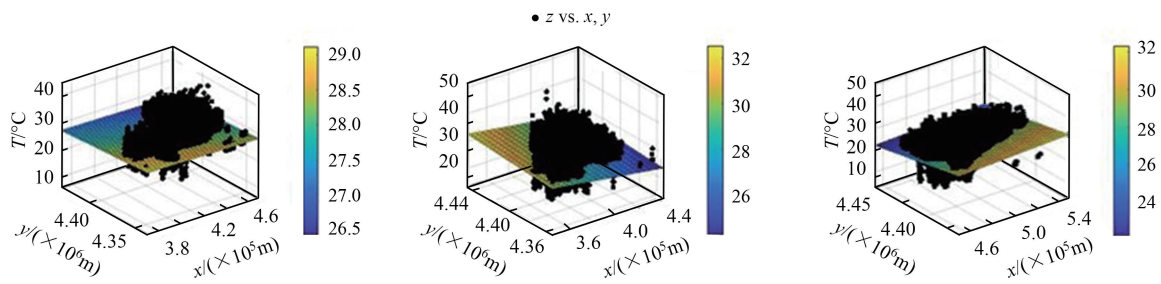


图 4 北三市背景场曲面

Fig.4 The Background surface of northern three districts

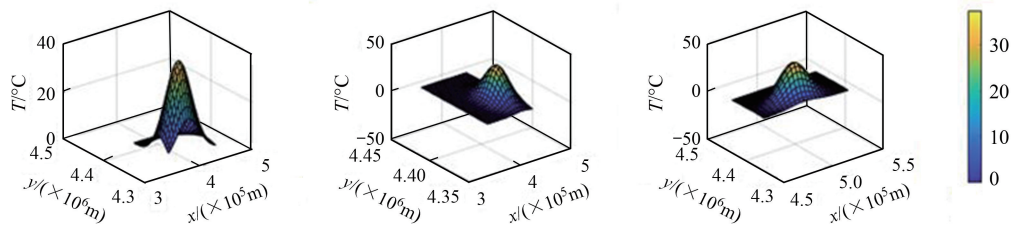


图 5 北三市 UHI 曲面

Fig.5 The UHI surface of northern three districts

2013 至 2016 年间,因建成区相隔较远,所以没有出现热岛效应叠加的情况,所以两座城市间的基于热环境的最小生态安全距离也相隔较远,两城市间的生态环境相对安全。

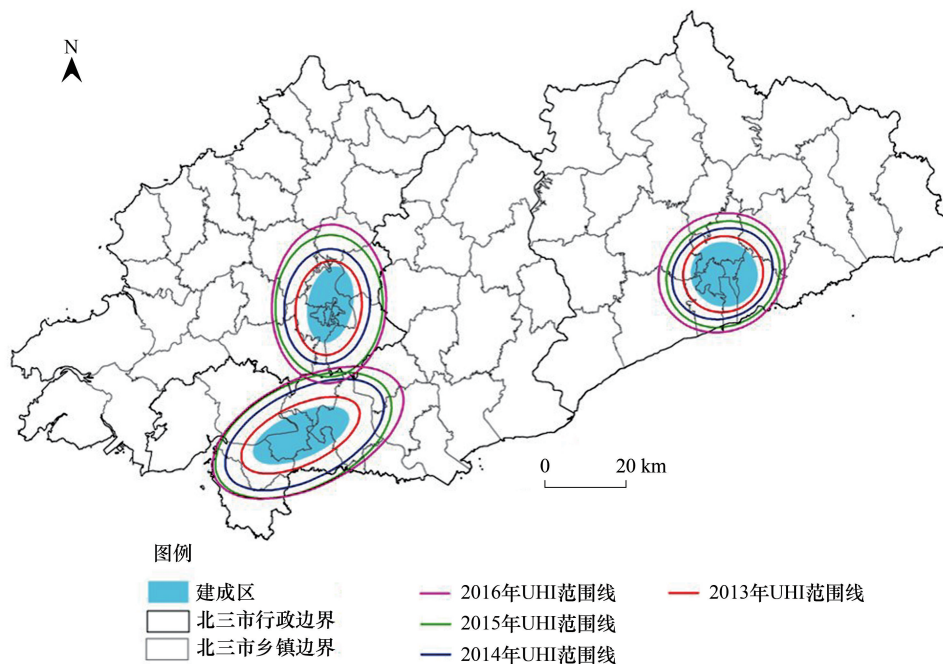


图 6 2013—2016 年最小生态安全距离空间分布

Fig.6 The MDES spatial distribution from 2013 to 2016

在 2013 年至 2016 年,普兰店市、瓦房店市、庄河市的城市热岛面积都有逐渐扩大的趋势(图 6)。这 4 年间,普兰店市的热岛面积从 264.20 km² 扩大到 726.60 km²,其中,2013 年至 2014 年扩大最为明显,扩大了 248.60 km²,平均每年扩张 115.50 km²;瓦房店市的热岛面积从 217.40 km² 扩大到 630.20 km²,平均每年扩张

103.40 km²; 庄河市的热岛面积从 212.30 km² 扩大到 506.50 km², 平均每年扩张 73.50 km²。同时, 城市间的热环境视角下的最小生态安全距离也出现逐渐衰减的趋势。其中, 普兰店市与瓦房店市之间的最小生态安全距离由 8.70 km 衰减至 -3.10 km, 平均每年衰减 2.93 km; 而庄河市与普兰店市之间的最小生态安全距离由 73.47 km 衰减至 58.24 km, 平均每年衰减 3.80 km。

4 结论与讨论

城市热环境对局地气候、人居环境质量的影响日益加剧。定量计算热环境视角下的最小生态安全距离能够反映城市热环境叠加的污染程度。通过多年城市建成区与 UHI 范围线的比较, 可以对城市间最小生态安全距离进行历史和区域比对, 从而为城市管理、规划决策部门提供客观、连续的衡量指标, 具有较高的科学意义和实用价值。本文在热环境视角下的最小生态安全距离的实质内涵的基础上, 通过建立高斯混合模型和建立热岛信号函数, 对 2013 年至 2016 年间大连市北三市的城市热岛面积和最小生态安全距离的测算。通过分析得到以下结论:

(1) 2013 年至 2016 年, 大连市北三市的城市热岛面积逐渐扩张, 总面积由 694.10 km² 扩张到 1864.30 km², 且普兰店市与瓦房店市在 2015 年之后热环境出现叠加的情况, 表明两城市间的生态环境受到了热环境的污染。

(2) 这 4 年间, 大连市北三市热环境视角下的最小生态安全距离逐渐衰减。其中, 普兰店市与瓦房店市之间的最小生态安全距离呈现逐渐恶化的现象, 由 8.70 km 衰减至 -3.10 km; 而普兰店市与庄河市之间的最小生态安全距离, 由 73.47 km 衰减至 58.24 km, 仍很安全。

综上所述, 从 2013 年至 2016 年大连市北三市城市内部热岛效应逐渐明显, 热岛面积不断扩大, 热环境视角下的最小生态安全距离逐年缩减, 甚至出现热环境叠加部分, 导致最小生态安全距离呈现出负值。为解决热环境视角下得城市间最小生态安全距离, 建议实施一些缓解城市内部热岛效应的措施, 以确保城市间的最小生态安全距离。

本文选取的研究区较为分散, 其热环境叠加和未叠加现象较为明显, 通过分析即可判断城市间的最小生态安全距离, 还有很多大型城市存在多核现象以及城市相邻式发展现象, 所引发城市热环境问题的机理更为复杂和繁琐, 这将在今后的工作中展开研究。此外, 本研究存在很多因素限制实验精度, 比如遥感影像的精度、通过 ArcGIS 对研究区重采样格网的大小、以及通过 UHI 拟合热环境曲面的精度等, 这些问题会在今后的研究中改进。

参考文献 (References):

- [1] 贾滨洋, 曾九利, 李玫, 柏松. “多规融合”下的城市开发边界与最小生态安全距离. 环境保护, 2015, 43(3): 23-26.
- [2] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504-513.
- [3] Zhang P, Imhoff M L, Wolfe R E, Bounoua L. Characterizing urban heat islands of global settlements using MODIS and nighttime lights products. Canadian Journal of Remote, 2010, 36(3): 185-196.
- [4] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology, 2011, 46(2): 696-703.
- [5] Qiao Z, Tian G J, Zhang L X, Xu X L. Influences of urban expansion on urban heat island in Beijing during 1989-2010. Advances in Meteorology, 2014, 2014: 187169.

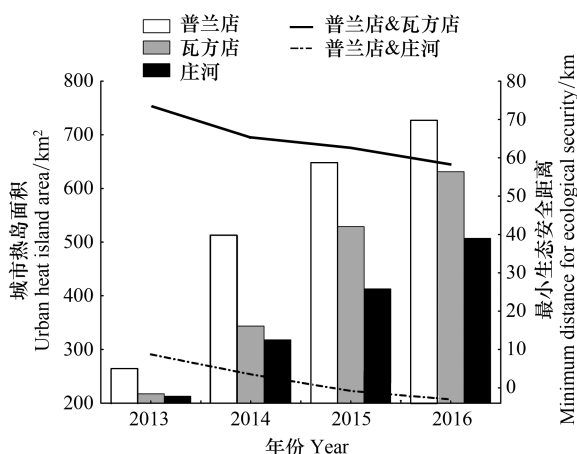


图 7 2013—2016 年最小生态安全距离随时间变化

Fig.7 The MDES varied with time between 2013 and 2016

- [6] Ke X L, Wu F, Ma C X. Scenario analysis on climate change impacts of urban land expansion under different urbanization patterns: a case study of Wuhan Metropolitan. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 293636.
- [7] 王晓云. 城市规划大气环境效应定量分析技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [8] 周纪, 陈云浩, 李京, 翁齐浩, 易文斌. 基于遥感影像的城市热岛容量模型及其应用——以北京地区为例. *遥感学报*, 2008, 12(5): 734-742.
- [9] 查良松, 王莹莹. 一种城市热岛强度的计算方法——以合肥市为例. *科技导报*, 2009, 27(20): 76-79.
- [10] 乔治, 田光进. 基于 MODIS 的 2001 年—2012 年北京热岛足迹及容量动态监测. *遥感学报*, 2015, 19(3): 476-484.
- [11] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, Sun G, Liu Y Q. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11160.
- [12] Yang Q Q, Huang X, Tang Q H. The footprint of urban heat island effect in 302 Chinese cities: temporal trends and associated factors. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 652-662.
- [13] 刘永畅. 中国地表城市热岛足迹主要特征及其主要影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 75-75.
- [14] Weng Q H, Liu H, Liang B Q, Lu D S. The spatial variations of urban land surface temperatures: pertinent factors, zoning effect, and seasonal variability. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2008, 1(2): 154-166.
- [15] Xu S L. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1/4): 289-300.
- [16] Sun R H, Lü Y H, Chen L D, Yang L D, Chen A L. Assessing the stability of annual temperatures for different urban functional zones. *Building and Environment*, 2013, 65: 90-98.
- [17] 徐文彬, 尹海伟, 孔繁花. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定. *生态学报*, 2017, 37(12): 4019-4028.
- [18] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(12): 4132-4144.
- [19] 徐新良, 乔治, 田光进, 张力小. 城市热环境: 格局·机理·模拟. 北京: 科学技术文献出版社, 2015.
- [20] Yang J, Jin S H, Xiao X M, Jin C, Xia J C, Li X M, Wang S J. Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101487.
- [21] 任超, 袁超, 何正军, 吴恩融. 城市通风廊道研究及其规划应用. *城市规划学刊*, 2014, (3): 52-60.
- [22] Yang J, Sun J, Ge Q S, Li X M. Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 1-10.
- [23] Yang J, Su J R, Xia J C, Jin C, Li X M, Ge Q S. The impact of spatial form of urban architecture on the urban thermal environment: a case study of the Zhongshan district, Dalian, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(8): 2709-2716.
- [24] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 229-239.
- [25] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli K, Berliner B. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. *地理学报*, 2001, 56(4): 456-466.
- [26] 何庆, 易娜, 汪新勇, 江立斌. 基于高斯混合模型的最大期望聚类算法研究. *微型电脑应用*, 2018, 34(5): 50-52, 75-75.
- [27] 苏嘉庚. EM 算法下的快速收敛参数预估策略. *电子技术与软件工程*, 2017, (1): 173-173.
- [28] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. *生态学报*, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [29] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测. *生态学报*, 2018, 38(5): 1650-1660.
- [30] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.