

DOI: 10.5846/stxb202102210480

张秀,王旭红,郑玉蓉,崔思颖,杨霞,蒋子琪.气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度对城市热岛强度的影响——以关中地区为例.生态学报,2021,41(22):8965-8976.

Zhang X, Wang X H, Zheng Y R, Cui S Y, Yang X, Jiang Z Q. Effects of aerosol optical depth and impervious surface percentage on urban heat island intensity: A case study in Guanzhong Region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8965-8976.

# 气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度对城市热岛强度的影响

——以关中地区为例

张 秀<sup>1,2,3</sup>, 王旭红<sup>1,2,3,\*</sup>, 郑玉蓉<sup>1,2,3</sup>, 崔思颖<sup>1,2,3</sup>, 杨 霞<sup>1,2,3</sup>, 蒋子琪<sup>1,2,3</sup>

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

3 陕西西安城市生态系统定位观测研究站, 西安 710127

**摘要:**城市热岛效应(UHI)是人们最为关注的城市生态环境热点问题之一,城市热岛及其影响因子的研究对生态城市建设具有重要意义。利用城市热岛足迹(UHI FP)、局部 $G^*$ 指数、Pearson 相关系数以及气溶胶定量归因分析法研究了气溶胶光学厚度(AOD)和不透水地表覆盖度(ISP)对城市热岛的影响。研究表明:在2000—2018年间,关中地区西安及咸阳(西咸)城区的白天/夜晚城市热岛足迹均有显著增加,城市热岛效应逐年增强。西咸白天/夜晚城市热岛足迹范围比宝鸡市大,城市热岛现象更为明显。西咸城区夜晚热岛足迹范围内被地表温度(LST)高值所占据,夜晚城市热岛效应比白天更明显。宝鸡市虽然热岛足迹范围增减幅度不大,但足迹内白天/夜晚LST次热区面积逐渐增大,城市热岛效应日趋增强。西咸、宝鸡市城区的夜晚城市热岛强度( $\Delta T$ )与不透水地表覆盖度呈显著正相关关系,与城乡气溶胶光学厚度之差( $\Delta AOD$ )呈明显负相关性。西咸城乡 $\Delta AOD$ 为负,对城市热岛强度的平均贡献度为 $(0.41 \pm 0.14)^\circ\text{C}$ ;宝鸡市城乡 $\Delta AOD$ 为正,其平均贡献度为 $(-0.26 \pm 0.25)^\circ\text{C}$ 。综上所述,城市不透水地表面积的扩张会使城市热岛效应进一步加剧,西咸与宝鸡市城市热岛强度的增加会抑制城市热岛的形成,但综合其他因子的影响作用,西咸与宝鸡市城市热岛强度仍在逐年增加。

**关键词:**城市热岛足迹;不透水地表;局部 $G^*$ 指数; Pearson 相关系数; AOD 归因分析

## Effects of aerosol optical depth and impervious surface percentage on urban heat island intensity: A case study in Guanzhong Region

ZHANG Xiu<sup>1,2,3</sup>, WANG Xuhong<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHENG Yurong<sup>1,2,3</sup>, CUI Siying<sup>1,2,3</sup>, YANG Xia<sup>1,2,3</sup>, JIANG Ziqi<sup>1,2,3</sup>

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China

3 Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Northwest University, Xi'an 710127, China

**Abstract:** The urban heat island effect (UHI) is one of the hot issues of urban ecological environment that people are most concerned about. It is of great significance to explore urban heat island effect and its impact factors for the construction of eco-city development. In this paper, the effect of aerosol optical depth (AOD) and impervious surface percentage (ISP) on urban heat island was investigated via the urban heat island footprint (UHI FP), Getis-Ord  $G^*$ , Pearson correlation and AOD quantitative attribution analysis method. The results show that between 2000 and 2018, the day/night UHI FP in the urban area of Xi'an and Xianyang (Xixian) increased significantly and the influence of UHI was enhanced year by year.

**基金项目:**国家自然科学基金(41971387, 41071271);陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JM-430)

**收稿日期:**2021-02-21; **接收日期:**2021-08-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jqy\_wxh@nwu.edu.cn

The day/night UHI FP of Xixian was wider than that of Baoji, and the UHI phenomenon of Xixian was more obvious. The UHI FP of Xixian at night was almost entirely dominated by the high land surface temperature (LST) value, and UHI at night was more obvious than during the day. Although Baoji's UHI FP did not increase or decrease significantly, the day/night LST sub-heat zone area within UHI FP of Baoji increased gradually, and UHI significantly increased. The impervious surface percentage in the urban area of Xixian, Baoji was significantly positively correlated with night urban island intensity ( $\Delta T$ ). The difference between urban and rural aerosol optical depth ( $\Delta AOD$ ) was also significantly negatively correlated with night  $\Delta T$ .  $\Delta AOD$  in the Xixian was negative, and the average contribution was  $(0.41 \pm 0.14) ^\circ\text{C}$ . The  $\Delta AOD$  of urban and rural values in Baoji were positive, and the average contribution was  $(-0.26 \pm 0.25) ^\circ\text{C}$ . In general, the expansion of urban impervious surface will further worsen UHI, and the increase of AOD in the urban area will inhibit UHI formation. However, UHI intensity of Xixian and Baoji is still increasing year over year due to the comprehensive influence of other factors.

**Key Words:** urban heat island footprint; impervious surface; Getis-Ord  $G^*$ ; Pearson correlation; aerosol optical depth attribution analysis

城市热岛效应(Urban heat island effect, UHI)是指城市地区温度比周围郊区温度高的现象,由人类活动导致的城市气候环境变化<sup>[1]</sup>和城市化快速发展而引起的城市生态环境效应<sup>[2]</sup>。城市热岛增加了空气制冷、供暖等所带来的燃料燃烧和能源消耗<sup>[3]</sup>。此外,城市热岛是城市空气污染的主要贡献者<sup>[4]</sup>,会使城市局地气候环境变得更为严峻。有研究表明,城市热岛与热浪之间的协同作用会增加城市的热风险<sup>[5-6]</sup>,过热的室外环境会威胁到人类身体健康与居住环境的舒适性<sup>[7-9]</sup>,研究城市热岛效应时空变化规律及其影响因子对于制定缓解城市热岛效应的措施具有重要作用。

由于城市热岛为城市带来诸多的负面影响,城市热岛及其影响因子的研究已成为 20 世纪以来的多领域多学科关注的热点。城市热岛形成的原因大概分为两种:一是社会原因,主要包括人口规模、交通、建筑物以及 GDP 等;二是自然原因,主要有土地利用类型、风速风向、湿度和大气中的悬浮颗粒物等。国内外学者对这两大驱动因素都已做了深入研究,例如社会经济因素中的人口规模与 GDP 的增长是 UHI 加剧的主要社会因素<sup>[10]</sup>,人类的生产、生活活动以及交通所排放的人为热会促进城市内部气温向高值区发展<sup>[11-12]</sup>。此外,建筑高度和建筑密度的增加会导致城市热岛强度的增加<sup>[13-14]</sup>。在自然原因中,不同的土地利用类型对 UHI 影响是有差异的,植被和水体都能起到调节城市局地气候的作用,减轻城市热岛效应<sup>[15-17]</sup>;不透水地表与裸土因反照率小,吸热快,对城市热岛效应有促进作用<sup>[18-19]</sup>,特别是不透水地表与夜间 UHI 有显著正相关<sup>[20]</sup>。此外,已有研究表明局地气候因素也会影响城市热岛,其中炎热潮湿的气候会放大城市热岛效应<sup>[21]</sup>,潜热和显热亦会对城市热岛造成影响<sup>[22]</sup>。Ngarambe<sup>[23]</sup>通过回归分析和方差分析检验,发现大气中的 CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 等与 UHI 呈正相关,表明大气污染的加重也会导致城市热岛效应的加剧。然而,大气中气溶胶浓度对城市热岛强度的正负影响还未达成一致性的研究结论。有学者认为气溶胶颗粒物浓度与城市热岛强度之间存在显著正相关<sup>[24-25]</sup>,大气中的气溶胶阻挡了空气的垂直与平行流动,使得城市内部热量扩散较弱,起到了保温的作用。另有研究表明气溶胶与 UHI 呈负相关<sup>[26-27]</sup>,气溶胶吸收和散射太阳短波辐射,使到达地面的辐射减少,进而导致地面降温。综上研究,目前对由城乡  $\Delta AOD$  辐射效应而导致城市内地表温度变化以及城乡  $\Delta AOD$  对城市热岛强度贡献的定量研究仍然较少,对城乡  $\Delta AOD$  与 UHI 的相互关系仍需深入研究和分析。

关中地区因特殊地形阻碍,大气颗粒物扩散不畅,雾霾污染甚为严重,城市化进程中的城市热岛效应与气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度的关系还未得到深入的研究和分析。因此,本文利用热岛足迹、局部  $G^*$  指数空间自相关分析、Pearson 相关分析和 AOD 定量归因分析等方法来探究关中地区城市热岛效应的时空变化,以及气溶胶浓度变化和不透水地表扩张对城市热岛效应的影响,这对缓解关中城市群城市热岛效应,建设生态型城市具有重要意义,并为城市未来发展规划提供必要的理论依据。

## 1 数据来源与预处理

### 1.1 研究区概况

关中地区是陕西省的政治、经济、文化中心,从古至今都具有极其重要的政治、经济、军事地位。地处陕西省中部,北临黄土高原,南靠秦岭,总面积为 55386km<sup>2</sup>,辖西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川、杨凌 5 市 1 区(图 1)。气候属于暖温带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年降水量达 604mm,降水主要集中于夏秋两季,年平均气温为 12—13.6℃。2018 年底常住人口为 2448.15 万人,国民生产总值达 15237.60 亿元,占陕西省的 62.35%,城市化率达 58.13%。其中,西安市是重点建设的国家级中心城市之一,连接着我国东西两大经济区,是西北地区最大的城市,具有不可替代的经济地位。同时,西安市是一带一路的重要节点城市,因其优越的地理位置,在全球化经济发展中具有重要的战略地位。

由于渭南、铜川城区面积过小,城市热岛效应不明显,热岛足迹不易划分,故不做研究,本文着重研究西安、咸阳和宝鸡市城区的城市热岛效应、AOD 和白天/夜晚 LST 冷热点分布规律,ISP、城乡  $\Delta$ AOD 与城市热岛强度关系以及城乡  $\Delta$ AOD 对城市热岛强度的贡献度。

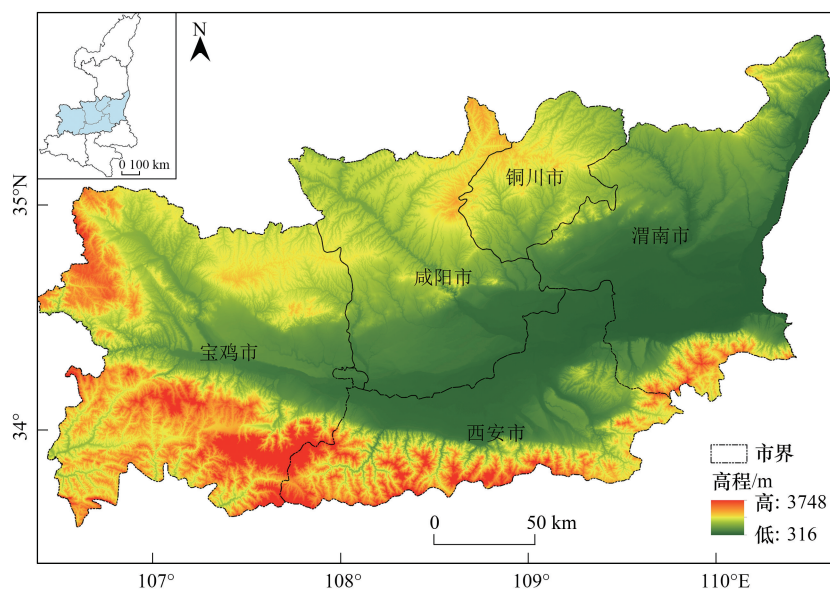


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

### 1.2 数据来源

城市热岛效应一般可用气温和地温表示<sup>[28]</sup>,本文仅选取白天/夜晚地表温度(LST)来研究近 20 年来关中地区城市群的热岛时空分布规律,主要研究时段为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年。地表温度 LST 选用分辨率为 1km 的 8 天合成产品 MOD11A2,其白天与夜晚的地温由通道 31 与 32 劈窗算法<sup>[29]</sup>反演得到,其反演精度达到 1K<sup>[30]</sup>。MOD11A2 数据需要在 MRT 中进行批量投影与拼接,然后对缺省值和无效值进行剔除,将 DN 值转换为真实地温值,转换公式为:

$$T = 0.02 \times DN - 273.15 \quad (1)$$

式中,  $T$  为地表真实温度(℃),  $DN$  值为其像元灰度值,0.02 为头文件中的辐射缩放比例。

气溶胶光学厚度(AOD)是大气气溶胶重要的光学特性参数,是表征大气气溶胶含量及大气浑浊度的重要物理量<sup>[31]</sup>,本文采用 MOD04\_3K 产品中的“Optical\_Depth\_Land\_And\_Ocean”数据集,它是基于暗像元算法得出的全球气溶胶日产品。MODIS 产品获取的轨道号为 H26V5 和 H27V5。

人工不透水地表面积数据和建成区边界数据从宫鹏研究团队的全球人工不透水区域 (GAIA) 和全球建成区边界 (GUB) 数据成果中下载 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn>)。GAIA 是基于 GEE 平台绘制而成, 其平均精度高于 90%<sup>[32]</sup>。GUB 数据与夜间灯光数据和人工解译图具有良好的一致性<sup>[33]</sup>, 本文提取关中地区建成区边界作为城区边界, 包括西咸、宝鸡市城区, 主要用于研究城市热岛足迹。

## 2 研究方法

### 2.1 城市热岛足迹

城市热岛足迹是指受城市热岛效应影响的区域, 即城市热岛效应产生的空间范围<sup>[34]</sup>。城市热岛足迹越大, 说明需要更多的土地来吸收人类活动所排放的人为热等。为了减少对城市热岛效应分布范围的主观干扰, 利用改进的半径法来确定城市热岛足迹。城市热岛效应的分布范围通常与城区分布相重合, 因此在 ArcGIS 中提取城市城区的重心, 作为同心环带的中心。经过多次实验, 最终确定两个城区的同心圆形的最佳半径为 5 km, 外环每一个圆环面积  $S_i$  要与同心圆形面积  $S_1$  相等, 因此每个圆环的半径为  $5\sqrt{i}$  km, 其中  $i$  为同心圆环的环数 (公式 2), 确定环数为 40 环, 以覆盖全部城区。判定城市热岛足迹的依据是统计每个圆环中的平均地温, 绘制散点图 (图 2), 若散点图中有明显的拐点, 且拐点外的地温趋于平缓, 表明该拐点之内的圆环范围即为城市热岛足迹。如 2000 年西咸在第 6 环处前后地温有明显的变化, 且在第 6 环后的地温趋于平缓, 即第 6 环为拐点, 因此前 6 环范围确定为西咸城区的城市热岛足迹 (图 2)。

$$\begin{cases} r_1 = 5 \\ S_1 = \pi r_1^2 = 25\pi \\ S_2 = \pi r_2^2 - \pi r_1^2 = \pi r_2^2 - 25\pi = S_1 = 25\pi \\ r_2 = 5\sqrt{2} \\ \vdots \\ r_i = 5\sqrt{i} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 局部 $G^*$ 指数

Getis-Ord  $G^*$  指数<sup>[35]</sup> 用于研究观测值的热点与冷点聚集分布, 分析地温与 AOD 时空变化特征, 表达式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (3)$$

式中,  $W_{ij}$  为  $i, j$  的空间权重矩阵,  $d$  为权重距离,  $x_j$  为网格  $j$  所在的地表温度或 AOD 值。为了解释和比较, 可用  $Z(G^*)$  值对局部  $G^*$  指数进行标准化处理,  $Z(G^*) = (G_i^* - E(G^*)) / \sqrt{\text{Var}(G^*)}$ , 其中  $E(G^*)$  和  $\text{Var}(G^*)$  分别为  $G_i^*(d)$  的数学期望与方差。当  $Z$  值为正且显著时, 则观测值为高值聚集, 即热点区; 当  $Z$  值为负且显著时, 则观测值为低值聚集, 即冷点区。

### 2.3 气溶胶对城市热岛强度贡献的定量分析

城市热岛强度表示为城市地温与周围乡村地温之差, 用于表征城市热岛效应影响的程度, 可用  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$  表示。因城市热岛足迹的确定不仅对城市热岛强度  $\Delta T$  计算有重要的影响<sup>[36]</sup>, 而且对估算城乡  $\Delta\text{AOD}$  对城市热岛强度的贡献力亦有重要的意义。因此, 利用已确定的热岛足迹为计算城市热岛效应的空间范围, 在足

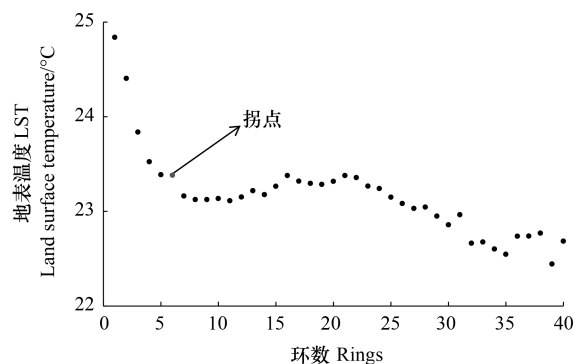


图 2 西咸城区各同心环内地表温度均值散点图 (2000 年白天)  
Fig.2 Scatter plot of mean surface temperature of Xixian rings (daytime, 2000)



迹范围内选取不透水地表覆盖区,计算年均白天/夜晚 LST 和 AOD,以此作为城区 LST 和 AOD 值;热岛足迹范围外扩 5km 建立乡村缓冲区,剔除 ISP 覆盖图斑,分别计算乡村 LST 和 AOD 值。

城乡  $\Delta AOD$  对城市热岛强度的贡献力  $\Delta T_{AOD}$  用归因分析方法计算得到,该方法由 Lee 等<sup>[37]</sup>提出,最初主要用于量化森林砍伐对气温的影响,之后由 Zhao<sup>[38]</sup>进一步拓展,用于研究美国东部城市气候对热岛效应的贡献,随后 Cao 等<sup>[39]</sup>进一步完善研究 AOD 对城市热岛强度的贡献。为了研究城乡 AOD 差异对城市热岛强度的贡献,在此引入 Cao 等的理论公式,表达式为:

$$\Delta T_{AOD} = \frac{\lambda_0}{1+f} \Delta L_{\downarrow} \quad (4)$$

式中,  $\Delta T_{AOD}$  为城乡  $\Delta AOD$  对城市热岛强度的贡献力 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda_0$  ( $\approx 0.2^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$ ) 为当地固有气候敏感性,  $f$  ( $\approx 1.7 \pm 0.9$ ) 为无量纲能量再分配因子,  $\Delta L_{\downarrow}$  是长波辐射  $L_{\downarrow}$  的城乡对比,用卫星观测的  $\Delta AOD$  与长波辐射对 AOD 的灵敏度的乘积来计算。因关中地区气候属于暖温带季风气候,查表可知该地区的 AOD 辐射效应灵敏度为  $(23.8 \pm 4.6) \text{ W/m}^2$ 。

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 城市热岛足迹

从图 3 中可以看出,近 20 年来,随着不透水地表的扩展,西咸城区白天/夜晚城市热岛足迹在总体上呈阶段性增加的态势。其中,2000 年白天的城市热岛足迹为前 6 环,在距离城区重心半径 11km 范围内。随着城市化进程的发展,至 2018 年城市热岛足迹达 33 环,距离城区重心距离增至 28.7km,热岛足迹范围是 2000 年的 6.8 倍,白天城市热岛足迹显著扩展。西咸城区夜晚的城市热岛足迹较小且增长缓慢,2000 年城市热岛足迹为前 3 环,到 2018 年时城市热岛足迹达 17 环,距离城区重心 20.6km,远远小于白天的热岛足迹。对比西咸城市热岛足迹昼夜变化,2018 年的白天热岛足迹是夜晚的 1.9 倍,表明白天城市热岛效应影响的范围更大。宝鸡市由于城区形态比较特殊,呈长条形,东部部分城区被渭河隔断,近 20 年来城区主要沿渭河呈东西向发展,不透水地表面积扩张缓慢,虽然城区重心有所变化,但距离相差不大。白天与夜晚热岛足迹基本保持不变,白天热岛足迹多年均为前 17 环,夜晚在 13 环附近,城市热岛效应影响范围变化不大。对比而言,近 20 年来西咸城区向四周扩展显著,其中 2018 年不透水地表面积是宝鸡市的 8.6 倍,热岛足迹在逐年增大,表明人工不透水地表增加会显著加强城市热岛效应<sup>[18]</sup>。

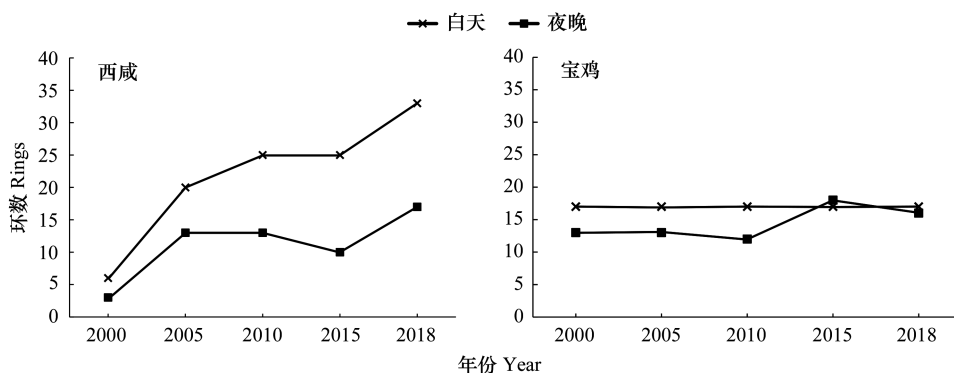


图 3 关中地区城市热岛足迹年际变化图

Fig.3 Annual variations of UHI FP in Guanzhong Region

#### 3.2 基于城市热岛足迹与局部 $G^*$ 指数的 UHI 和 AOD 时空变化

##### 3.2.1 城市热岛足迹内的 LST 和 AOD 冷热点

在 ArcGIS 中利用 Getis-Ord  $G^*$  聚类分布制图对局部  $G^*$  指数进行可视化表达,并按照自然间断点分级法

(Jenks)将白天/夜晚 LST 和 AOD 的  $G^*$  指数从低到高分冷点、次冷、次热、热点区 4 类。

将 LST 和 AOD 的局部  $G^*$  指数分布图与城市热岛足迹结合进行空间叠置分析,研究城区 LST 与 AOD 的冷热点与热岛足迹分布的一致性和异质性。如图 4 和图 6 所示,随着西咸城区范围的扩展,城市热岛足迹在不断扩大,热岛足迹内的白天 LST 热点面积显著提高,次热区面积在逐渐下降。足迹内白天 LST 热点区占比从 2000 年的 9.04% 上升到 2018 年的 53.62%,高值越来越聚集,白天城市热环境持续恶化。近 20 年来,足迹内的夜晚 LST 热点分布广,热点面积占比均在 90% 以上,表明夜晚城市热岛足迹与 LST 热点分布较为一致,足迹内无冷点与次冷点分布,夜晚城市热岛效应显著。在 2000 年至 2018 年,宝鸡市的白天/夜晚城市热岛足迹内多年均为 LST 次热区占主导,为较高值聚集,城市热环境较为严峻。白天 LST 次热区占比起伏较大,从 2000 年的 56.20% 下降至 2018 年的 36.19%,但仍占主导。夜晚 LST 次热区占比均在 50% 以上,夜晚热污染比白天严重。西咸与宝鸡市白天/夜晚城市热岛足迹内均为 LST 热点、次热区占主导,说明不透水地表会显著影响城市地表热环境,使得城区内部为高温所占据。

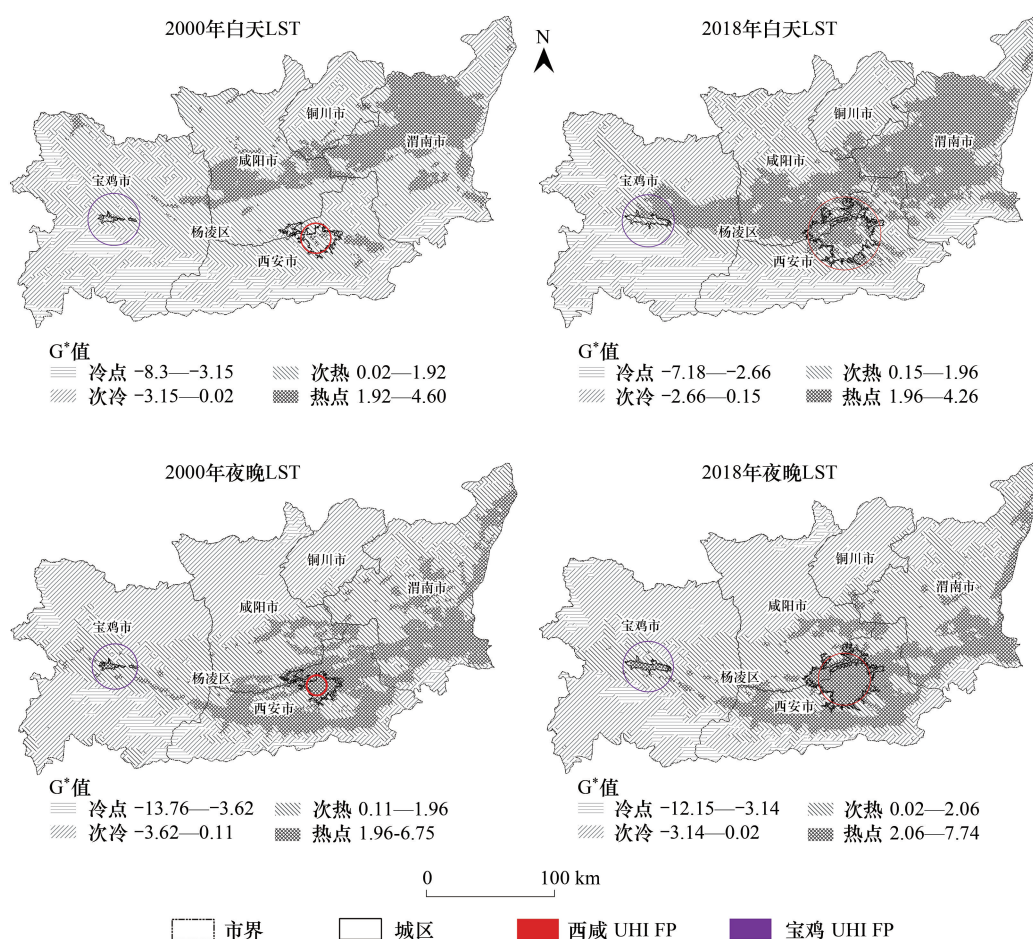


图 4 LST 局部  $G^*$  指数与城市热岛足迹

Fig.4 Getis-Ord  $G^*$  of LST and UHI FP

LST: 地表温度 Land surface temperature

由图 5 和图 6 可以看出,从 2000 年至 2018 年西咸白天城市热岛足迹内 AOD 热点占主导,占比均在 50% 左右,其次是次热区的分布。因夜晚城市热岛足迹比白天足迹普遍较小,在夜晚热岛足迹范围内 AOD 次热区分布最多,比例大于 30%,其次是热点的分布,表明气溶胶浓度会影响夜晚的城市热岛效应。从空间分布上看,AOD 热点分布于西咸城区周围,AOD 次热区分布于城区中心,这与加强西安古城的环境保护力度有关,使得城

市中心区 AOD 比周围低,高浓度气溶胶分布与城市中心区存在异质性。宝鸡市 2000 年的白天/夜晚热岛足迹内 AOD 热点、次热、次冷、冷点均有覆盖,而 2018 年白天/夜晚热岛足迹内无 AOD 热点分布,均为次冷点占主导,表明 2018 年宝鸡市城市热岛足迹内 AOD 值较低,空气质量有所改善,但城市热岛效应依然显著。

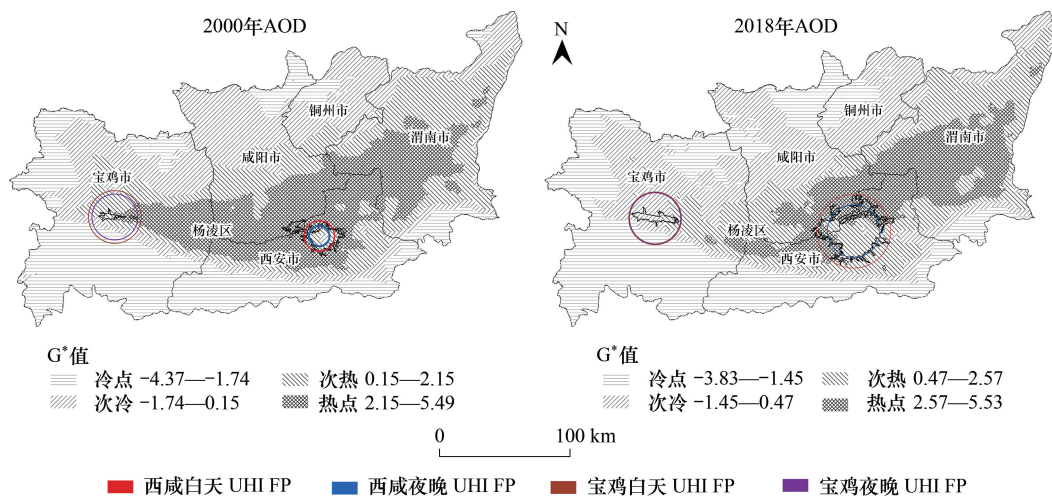


图5 AOD 局部  $G^*$  指数与城市热岛足迹

Fig.5 Getis-Ord  $G^*$  of AOD and UHI FP

AOD: 气溶胶光学厚度

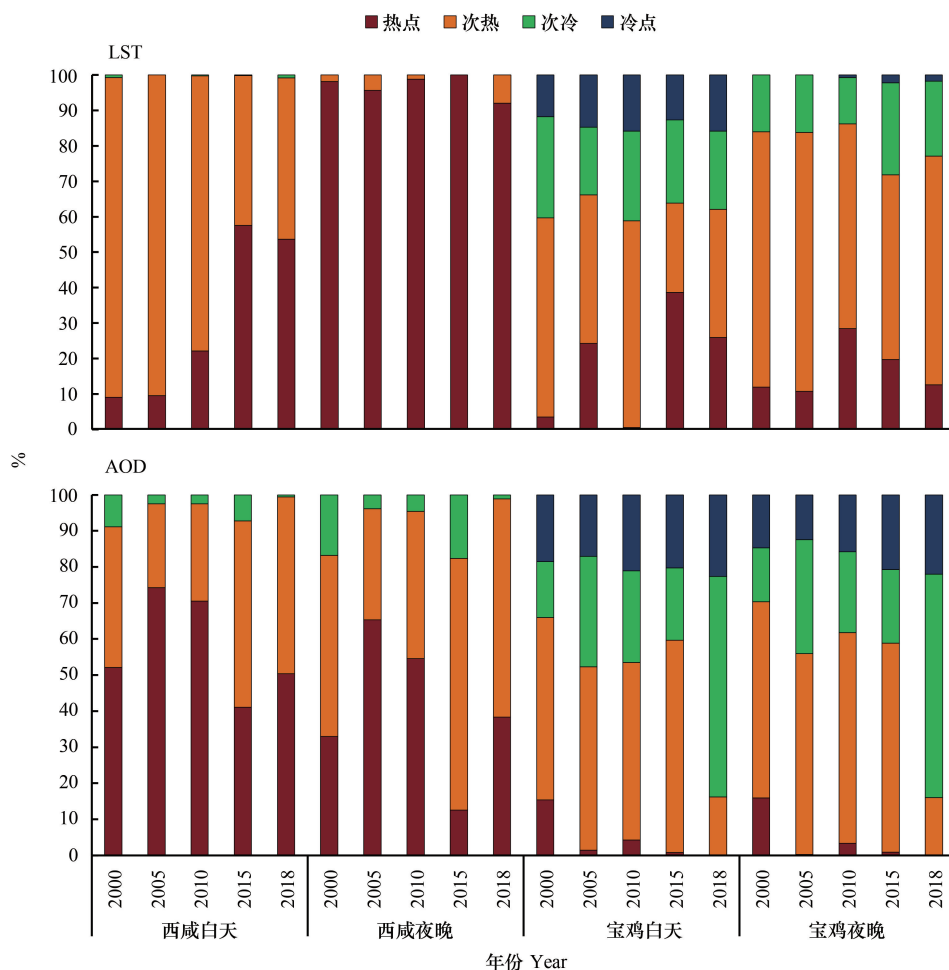


图6 热岛足迹内 LST 和 AOD 局部  $G^*$  指数面积变化

Fig.6 Getis-Ord  $G^*$  area changes of LST and AOD within the UHI FP



3.2.2 LST 和 AOD 的冷热点叠置分析

为了剖析关中地区城市热岛效应与 AOD 的高低值对应关系,将 2000 年至 2018 年白天/夜晚 LST 和 AOD 的热点与热点,冷点与冷点进行叠置分析,得到白天/夜晚 LST 和 AOD 热热点重合、冷冷点重合区(图 7 和表 1)。从时间上来看,关中地区白天 LST 和 AOD 热热点重合显著增加,面积从 2000 年的 2257km<sup>2</sup> 扩张到 2018 年的 8704km<sup>2</sup>,占比也从 4.08% 上升到 15.72%,说明关中地区空气污染与城市热岛效应有一定的对应关系。从空间区位上来看,热热点主要分布于关中地区的东部,因关中地区地势南北两边高,中间低平,西窄东宽的喇叭口状地形有利于偏北风将西部空气污染颗粒和陕北风沙带到东部下游地区<sup>[40]</sup>,导致东部气溶胶浓度高。此外,东部渭南市为传统的农业大市,夏季收割小麦,秋季收割玉米的耕作制度导致裸土面积广,地表温度较高,呈热热点聚集。至 2018 年,LST 和 AOD 热热点已扩展到关中中部盆地地区,表明城市热污染与大气污染两者均呈增强的态势。但西咸、宝鸡市城市中心区几乎无热热点分布(图 7),这是由于西咸城区环境保护措施力度加强等原因所导致 AOD 高值分布区域少,而宝鸡市处于偏西风上游,空气颗粒物向下游扩散,AOD 高值分布区亦较少,因此西咸和宝鸡市城市中心区 LST 与 AOD 热热点分布少。冷冷点主要分布于南部山区,因南部山区植被丰富,地势较高,人类活动少,故地表温度低,气溶胶载荷浓度低,LST 与 AOD 均呈冷点分布。

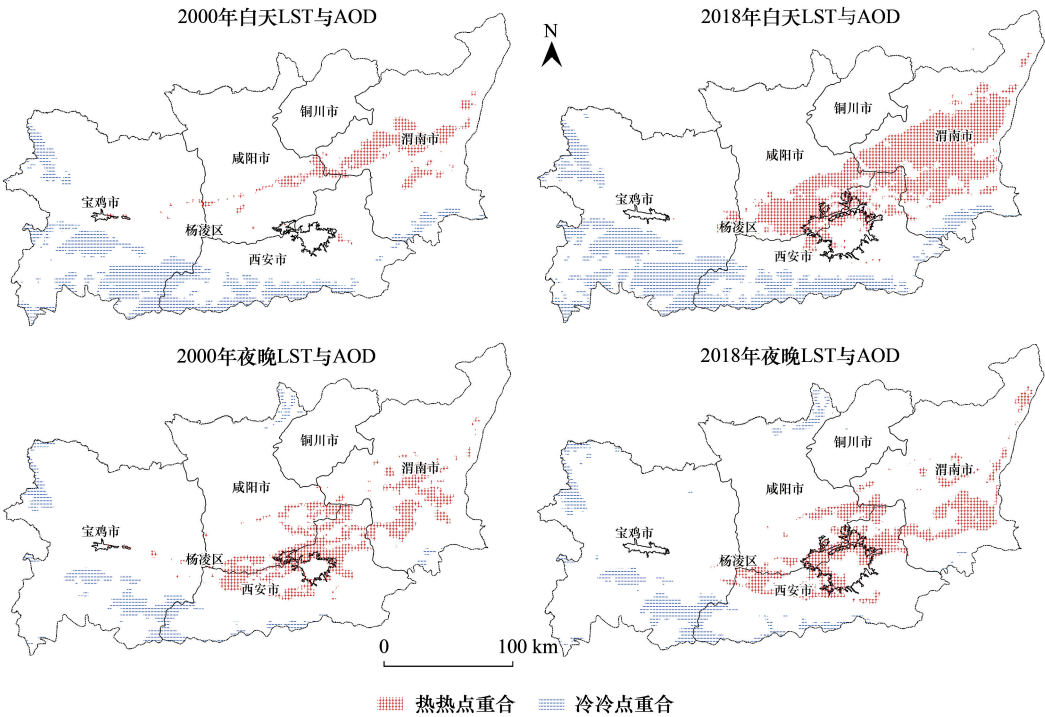


图 7 白天/夜晚地温与 AOD 冷热点重合区分布

Fig.7 Distribution of cold and hot spots overlap area of Day/Night LST and AOD

表 1 关中地区白天/夜晚 LST 与 AOD 冷热点重合区面积变化

Table 1 Variation of cold and hot spots overlap area of Day/Night LST and AOD in Guanzhong Region

年份 Year	白天 Day				夜晚 Night			
	热热点/km <sup>2</sup> Hot spots	占比/% Scale	冷冷点/km <sup>2</sup> Cold spots	占比/% Scale	热热点/km <sup>2</sup> Hot spots	占比/% Scale	冷冷点/km <sup>2</sup> Cold spots	占比/% Scale
2000	2257	4.08	6045	10.91	4533	8.18	2595	4.69
2005	3400	6.14	7379	13.32	6321	11.41	3027	5.47
2010	4475	8.08	8690	15.69	5486	9.91	2863	5.17
2015	6633	11.98	6766	12.22	5484	9.90	3587	6.48
2018	8704	15.72	7941	14.34	5150	9.30	3205	5.79

LST: 地表温度 Land surface temperature; AOD: 气溶胶光学厚度 Aerosol optical depth



### 3.3 城市热岛强度及其影响因子的关系

利用 Pearson 相关系数分析研究关中城乡  $\Delta AOD$ 、ISP 与白天/夜晚  $\Delta T$  的相关关系。从图 8 中可以看出,2000 年至 2018 年白天  $\Delta T$  与 ISP 相关性较弱,但夜晚  $\Delta T$  与 ISP 均呈显著正相关性。其中,西咸夜晚  $\Delta T$  与 ISP 的 Pearson 相关系数多年均在 0.65 以上 ( $P < 0.01$ ),城市地表所释放的热加剧夜间地温的升高。宝鸡市 ISP 对夜晚  $\Delta T$  影响也十分显著,2000 年至 2018 年平均相关系数为 0.52 ( $P < 0.01$ ),表明不透水地表覆盖度是城市夜间地温升高的重要驱动因子之一,因此控制不透水地表扩展对夜晚城市热岛效应的防治至关重要。

从图 8 可以看出,西咸  $\Delta AOD$  对白天热岛强度影响较小,相关系数年均均为 -0.26。夜晚  $\Delta T$  与  $\Delta AOD$  有着显著的负相关关系, Pearson 相关系数均小于 -0.44 ( $P < 0.01$ ),其中 2010 年  $\Delta AOD$  对夜晚  $\Delta T$  影响最为显著(线性相关系数为 -0.70,  $P < 0.01$ ),表明城区气溶胶光学厚度的增加会导致夜晚地温的降低。宝鸡市  $\Delta AOD$  与白天热岛强度呈正相关,但总体上相关性不显著。夜晚  $\Delta T$  与  $\Delta AOD$  大部分年份呈较显著的负相关,相关系数大都在 -0.2 以下 ( $P < 0.01$ ),表明城区内气溶胶光学厚度低值区却是地表温度高值分布区。 $\Delta AOD$  与夜晚城市热岛强度的显著负相关性,揭示出关中地区城市群气溶胶辐射效应对城市热岛强度的抑制作用。

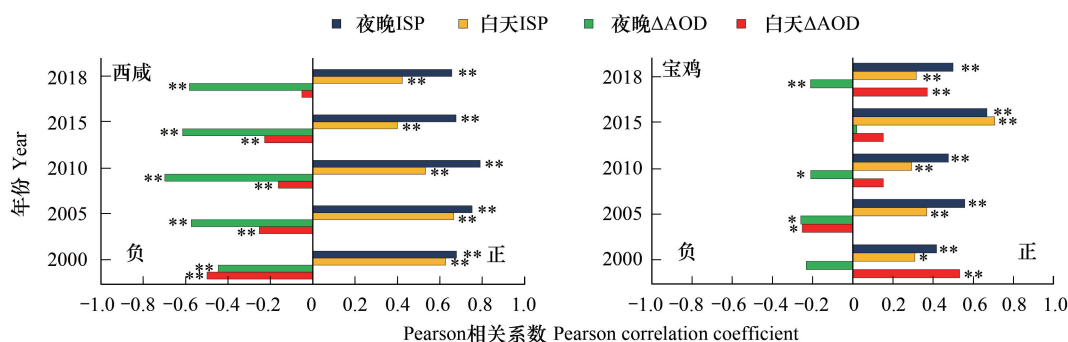


图 8 ISP、 $\Delta AOD$  与白天/夜晚  $\Delta T$  的关系

Fig.8 The relationship of day/night  $\Delta T$  with ISP,  $\Delta AOD$

ISP: 不透水地表覆盖度 Impervious surface percentage; \*\* 显著性水平  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$

### 3.4 气溶胶对城市热岛强度贡献的定量分析

因白天气溶胶辐射效应对城市热岛效应的影响是不确定的,故这里不做研究分析,仅研究西咸、宝鸡市每

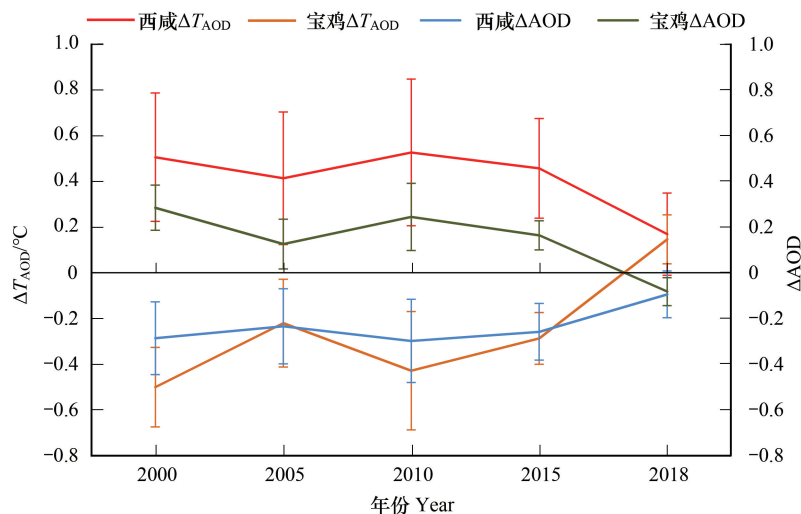


图 9 西咸、宝鸡城区年均  $\Delta AOD$  和  $\Delta T_{AOD}$  变化

Fig.9 Annual changes of  $\Delta AOD$  and  $\Delta T_{AOD}$  in main urban area of Xixian and Baoji

$\Delta T$ : 城市热岛强度 Urban island intensity

年  $\Delta AOD$  对夜晚城市热岛强度的贡献度。从图 9 可以看出,2000 年和 2018 年西咸城乡  $\Delta AOD$  均为负,其中 2000 年  $\Delta AOD$  为  $(-0.29 \pm 0.16)$ ,2018 年减小为  $(-0.10 \pm 0.10)$ ,表明城区的气溶胶浓度在增大,城乡  $\Delta AOD$  绝对值减小。因  $\Delta AOD$  与夜晚  $\Delta T$  的负相关性,当城乡  $\Delta AOD$  为负时,将加剧夜晚城市热岛强度的增加。从 2000 年至 2018 年, $\Delta AOD$  的平均贡献度为  $(0.41 \pm 0.14)^\circ\text{C}$ ,但贡献度从 2000 年  $(0.51 \pm 0.28)^\circ\text{C}$  降低至 2018 年  $(0.17 \pm 0.18)^\circ\text{C}$ ,表明城乡  $\Delta AOD$  对西咸城区热岛强度的影响力在逐年降低。宝鸡市除 2018 年  $\Delta AOD$  为  $(-0.08 \pm 0.06)$  外,其余年份的  $\Delta AOD$  全部为正,城区气溶胶光学厚度比乡村高,但总体上城乡  $\Delta AOD$  呈逐年降低趋势。宝鸡市城乡  $\Delta AOD$  正差值会使得夜晚城市热岛强度年均下降  $(0.26 \pm 0.25)^\circ\text{C}$ 。

从气溶胶辐射效应的贡献力上看,西咸  $|\Delta T_{AOD}|$  大于宝鸡市  $|\Delta T_{AOD}|$ ,表明西咸的城乡  $\Delta AOD$  辐射效应对城市热岛效应影响更大。由西咸城乡  $\Delta AOD$  气溶胶辐射作用所引起的夜晚热岛强度的增强叠加在因地表硬化而导致的城市热岛效应增加上(表 2),使得西咸城区城市热岛强度常年均在  $2^\circ\text{C}$  之上。此外,宝鸡市热岛强度亦有较为明显的增长,表明即使有气溶胶辐射效应降温作用,而由其他驱动因素导致的城市热岛强度仍在逐年增加,如不透水地表增加而导致的地表反照率减低、人为热排放增加等。

表 2 西咸、宝鸡城区年均夜晚  $\Delta T$  变化

Table 2 Annual changes of night  $\Delta T$  in main urban area of Xixian and Baoji

年份 Year	$\Delta T/^\circ\text{C}$		年份 Year	$\Delta T/^\circ\text{C}$	
	西咸	宝鸡		西咸	宝鸡
2000 年	2.05	2.27	2015 年	2.26	3.63
2005 年	2.04	2.31	2018 年	2.10	2.65
2010 年	2.07	2.70			

$\Delta T$ : 城市热岛强度 Urban island intensity

#### 4 讨论

研究结果显示,城市热岛足迹昼夜差异显著,西咸昼夜城市热岛足迹变化比宝鸡市变化大,表明不透水地表扩展和人为热排放等因素对城市热岛效应产生显著的影响<sup>[34]</sup>,不透水面改变地表的潜热与显热通量,是影响城市地表热环境变化的关键因素<sup>[41]</sup>。西咸与宝鸡市城区白天/夜晚的 LST 热点、次热分布面积变化与城市热岛足迹变化基本一致,即不透水地表覆盖度高的区域为 LST 热点、次热分布区,表明下垫面结构是城市地表温度总体分布的决定机制<sup>[42]</sup>,合理规划城市用地能有效调节城市热岛效应。西咸与宝鸡市 AOD 热点区主要分布于城市中心区周围,城市中心区为 AOD 次热点分布区,AOD 热点分布与城市热岛足迹中心区具有异质性。

在 Pearson 相关分析中,不透水地表覆盖度与夜晚城市热岛强度呈显著正相关性,揭示出沥青、混凝土等不透水地表在白天吸收和储存太阳辐射,夜晚逐渐释放热量,使得夜晚城市热环境更为严峻<sup>[20]</sup>。城乡  $\Delta AOD$  与夜晚城市热岛强度之间呈负相关性,气溶胶可以通过减少地表短波辐射的吸收而导致地表温度降低<sup>[43]</sup>。城区气溶胶浓度升高,增强了对长波辐射的吸收、散射作用,降低城区地表温度,减小了城乡夜晚地表温度的差异,这与多位学者研究结果相同<sup>[27, 44]</sup>。气溶胶辐射强迫对不同高度的城市气候具有不同的影响作用,唐利琴等<sup>[45]</sup>研究发现气溶胶辐射强迫对大气层顶和地面为冷却效应,对大气则是加热效应。因气溶胶分布和组成的时段性,不同时期的气溶胶浓度对城市热岛强度的影响亦暂无定论,Han 等<sup>[46]</sup>发现气溶胶对城市热岛强度影响差异很大,夏季气溶胶会抑制城市热岛强度,冬季则会加强城市热岛强度。而 Pandey 等<sup>[26]</sup>研究发现 AOD 与白天城市热岛效应呈正相关,与夜晚城市热岛效应呈负相关。本文仅研究年均夜晚  $\Delta T$  与  $\Delta AOD$  的相关性和城乡  $\Delta AOD$  对城市热岛强度的贡献,并未深入分析气溶胶辐射强迫对城市热岛效应的影响机制和时段的变化性与不确定性,后续将加强气溶胶辐射强迫效应对城市热岛强度的影响机理和不确定性研究。

#### 5 结论

以城市热岛足迹为基础,研究热岛足迹内部的 LST 和 AOD 的局部  $G^*$  指数分布、LST 和 AOD、ISP 的

Pearson 相关关系以及气溶胶对城市热岛强度的定量归因分析,最终得出以下结论:(1)西咸与宝鸡城市热岛足迹昼夜差异显著,白天城市热岛足迹明显高于夜晚。西咸因不透水地表向四周呈“摊大饼”式扩张,昼夜均比宝鸡市具有明显的城市热岛现象,且城市热岛足迹呈阶段性扩张。(2)西咸、宝鸡市白天/夜晚 LST 热点、次热区变化与城市热岛足迹变化基本一致,而 AOD 热点分布于热岛足迹中心周围,AOD 热点与 LST 热点分布具有异质性。(3)不透水地表覆盖度与夜晚城市热岛强度存在显著正相关性,不透水地表扩展会使夜晚地温升高。城乡  $\Delta$ AOD 与夜晚城市热岛强度呈显著负相关性,城区气溶胶浓度的增加会抑制城市热岛强度的上升。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Zhou D C, Xiao J F, Bonafoni S, Berger C, Deilami K, Zhou Y Y, Froking S, Yao R, Qiao Z, Sobrino J A. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 48.
- [ 2 ] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, Liu Q Y, Liu Y X. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: a radius approach. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792.
- [ 3 ] Ghadban M, Baayoun A, Lakkis I, Najem S, Saliba N A, Shihadeh A. A novel method to improve temperature forecast in data-scarce urban environments with application to the Urban Heat Island in Beirut. *Urban Climate*, 2020, 33: 100648.
- [ 4 ] Edmondson J L, Stott I, Davies Z G, Gaston K J, Leake J R. Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 33708.
- [ 5 ] Founda D, Santamouris M. Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10973.
- [ 6 ] 敖翔宇, 谈建国, 支星, 过霁冰, 陆一闻, 刘冬韩. 上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子. *地理学报*, 2019, 74(9): 1789-1802.
- [ 7 ] Haddad S, Paolini R, Ulpiani G, Synnefa A, Hatvani-Kovacs G, Garshasbi S, Fox J, Vasilakopoulou K, Nield L, Santamouris M. Holistic approach to assess co-benefits of local climate mitigation in a hot humid region of Australia. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14216.
- [ 8 ] Mendez-Astudillo J, Lau L, Tang Y T, Moore T. A new Global Navigation Satellite System (GNSS) based method for urban heat island intensity monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 94: 102222.
- [ 9 ] Smargiassi A, Fournier M, Griot C, Baudouin Y, Kosatsky T. Prediction of the indoor temperatures of an urban area with an in-time regression mapping approach. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2008, 18(3): 282-288.
- [ 10 ] Li Y, Sun Y W, Li J L, Gao C. Socioeconomic drivers of urban heat island effect: empirical evidence from major Chinese cities. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102425.
- [ 11 ] Litardo J, Palme M, Borbor-Cordova M, Caiza R, Macias J, Hidalgo-Leon R, Soriano G. Urban heat island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102387.
- [ 12 ] 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 人为热排放对城市热环境的影响研究展望. *生态学报*, 2017, 37(12): 3991-3997.
- [ 13 ] Li Y F, Schubert S, Kropp J P, Rybski D. On the influence of density and morphology on the urban heat island intensity. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2647.
- [ 14 ] Sangiorgio V, Fiorito F, Santamouris M. Development of a holistic urban heat island evaluation methodology. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17913.
- [ 15 ] Al-Saadi L M, Jaber S H, Al-Jiboori M H. Variation of urban vegetation cover and its impact on minimum and maximum heat islands. *Urban Climate*, 2020, 34: 100707.
- [ 16 ] Li L, Zha Y, Zhang J H. Spatially non-stationary effect of underlying driving factors on surface urban heat islands in global major cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 90: 102131.
- [ 17 ] Chao Z H, Wang L X, Che M L, Hou S F. Effects of different urbanization levels on land surface temperature change: taking tokyo and shanghai for example. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2022.
- [ 18 ] 潘涛, 张弛, 杜国明, 董金玮, 迟文峰. 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 134-142.
- [ 19 ] 李孝永, 匡文慧. 北京、天津和石家庄城市地表覆盖组分与结构特征对地表温度的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3057-3065.
- [ 20 ] Mathew A, Khandelwal S, Kaul N. Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: study of Chandigarh City, India. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 26: 264-277.
- [ 21 ] Sun R H, Lü Y H, Yang X J, Chen L D. Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 743-752.

- [22] Hou H R, Liu K, Li X K, Chen S H, Wang W M, Rong K. Assessing the urban heat island variations and its influencing mechanism in metropolitan areas of Pearl River Delta, South China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 120: 102953.
- [23] Ngarambe J, Joen S J, Han C H, Yun G Y. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123615.
- [24] Jonsson P, Bennet C, Eliasson I, Lindgren E S. Suspended particulate matter and its relations to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(25): 4175-4181.
- [25] Li H D, Meier F, Lee X, Chakraborty T, Liu J F, Schaap M, Sodoudi S. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 818-828.
- [26] Pandey A K, Singh S, Berwal S, Kumar D, Pandey P, Prakash A, Lodhi N, Maithani S, Jain V K, Kumar K. Spatio-temporal variations of urban heat island over Delhi. *Urban Climate*, 2014, 10: 119-133.
- [27] Wu H, Wang T J, Riemer N, Chen P L, Li M M, Li S. Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11422.
- [28] Sheng L, Tang X L, You H Y, Gu Q, Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 738-746.
- [29] Wan Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 36-45.
- [30] Hassan Q K, Bourque C P A, Meng F R, Cox R M. A wetness index using terrain-corrected surface temperature and normalized difference vegetation index derived from standard MODIS products; an evaluation of its use in a humid forest-dominated region of eastern Canada. *Sensors*, 2007, 7(10): 2028-2048.
- [31] 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼. 基于 MODIS\_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征. *环境科学*, 2018, 39(8): 3563-3570.
- [32] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [33] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X, Yu L, Clinton N, Zhu Z L. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [34] 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.
- [35] Getis A, Ord K J. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [36] 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(1): 11160.
- [37] Lee X, Goulden M L, Hollinger D Y, Barr A, Black T A, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu L H, Katul G, Kolb T, Law B E, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Paw U K T, Richardson A D, Schmid H P, Staebler R, Wofsy S, Zhao L. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 2011, 479(7373): 384-387.
- [38] Zhao L, Lee X, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [39] Cao C, Lee X, Liu S D, Schultz N, Xiao W, Zhang M, Zhao L. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12509.
- [40] Bei N F, Zhao L N, Xiao B, Meng N, Feng T. Impacts of local circulations on the wintertime air pollution in the Guanzhong Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 373-390.
- [41] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [42] 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.
- [43] Sussman H S, Raghavendra A, Zhou L M. Impacts of increased urbanization on surface temperature, vegetation, and aerosols over Bengaluru, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 16: 100261.
- [44] 吴昊, 王体健, 方欢, 马亚平, 韩永秋, 黄澍, 姚宇昂, 史均清. 南京细颗粒物对城市热岛强度的影响. *大气科学学报*, 2014, 37(4): 425-431.
- [45] 唐利琴, 胡波, 刘慧, 赵舒曼, 刘俊卿. 近十年北京气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究. *气候与环境研究*, 2021, 26(2): 155-168.
- [46] Han W C, Li Z Q, Wu F, Zhang Y W, Guo J P, Su T N, Cribb M, Fan J W, Chen T M, Wei J, Lee S S. The mechanisms and seasonal differences of the impact of aerosols on daytime surface urban heat island effect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(11): 6479-6493.