

DOI: 10.5846/stxb202007251947

闫章美,周德成,张良侠.我国三大城市群地区城市和农业用地地表热环境效应对比研究.生态学报,2021,41(22):8870-8881.

Yan Z M, Zhou D C, Zhang L X. Contrasting surface thermal environmental effects of urban and agricultural lands in three major urban agglomerations in China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8870-8881.

# 我国三大城市群地区城市和农业用地地表热环境效应对比研究

闫章美<sup>1,2</sup>, 周德成<sup>1,2,\*</sup>, 张良侠<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

2 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475001

**摘要:**以大中小城市协同发展为特征的城市群已成为我国城市化发展的主要形式,城市化和农业作为城市群地区最主要的土地利用活动,其气候效应是国际研究的热点。然而过去研究多关注大城市的热岛效应,对更为普遍的农业活动以及中小城市城市化的气候效应认识十分薄弱。基于 MODIS 地表温度数据,以自然林地为参照,提出了一种可逐像元估算土地利用地表热环境效应的新方法,进而对比分析了我国三大城市群地区(京津冀、长三角和珠三角)城市和农业用地地表热环境效应及其驱动因子差异。结果表明各城市群白天城市热岛效应明显,地级以上城市年平均热岛强度达 3.2℃ 以上,但最强热岛均未发生在核心城市。夜晚热岛效应明显减弱,京津冀和长三角部分城市甚至出现冷岛效应。农业用地在白天亦表现出明显的增温效应,特别是在京津冀地区,而在夜晚除珠三角城市群外,降温效应明显,京津冀和长三角地区平均降温 2.3℃ 和 0.7℃。虽然城市用地平均增温强度大于农业用地,但农业用地因面积优势对区域温度变化起控制作用。白天城市和农业用地整体导致各城市群温度明显增加,京津冀增温最高(4.0℃),夜晚二者导致长三角和京津冀地区平均温度降低。研究还发现各城市群城市和农业用地地表热环境效应时空异质性极大,主要受植被、地表反照率、气候背景和人口密度控制。本文对制定缓解气候变化的土地利用策略具有重要的指导意义。

**关键词:**土地利用活动;城市热岛;农业;热环境效应;城市群

## Contrasting surface thermal environmental effects of urban and agricultural lands in three major urban agglomerations in China

YAN Zhangmei<sup>1,2</sup>, ZHOU Decheng<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Liangxia<sup>1</sup>

1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Kaifeng 475001, China

**Abstract:** Urban agglomerations, characterized by the synergetic development of large, medium, and small cities, are becoming the main form of urbanization in China. The climate effects of urbanization and agriculture, two most pervasive land use activities, have been the subject of active investigation. However, previous studies focused mainly on the urban heat island (UHI) effect of mega cities, while the climate effects of the more widespread agricultural activities and the urbanization in small/medium cities remain poorly understood. Using natural forests as reference, we proposed a new method to estimate the surface thermal environmental effects of human land use activities on a per-pixel basis based on MODIS land surface temperature (LST). We then compared the thermal effects of urban and agricultural lands and their drivers in three major urban agglomerations, China, namely Beijing-Tianjin-Hebei (BTHUA), Yangtze River Delta (YRDUA), and Pearl

**基金项目:**黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室开放基金(GTYR201805);国家自然科学基金项目(41501465);江苏高校“青蓝工程”项目(R2019Q02)

收稿日期:2020-07-25; 接收日期:2021-06-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoudc@nuist.edu.cn

River Delta (PRDUA). Results showed that the daytime UHI effects were significant in all the urban agglomerations, with annual mean intensity larger than 3.2 °C for all the cities above prefecture-level, but the strongest did not occur in the core cities. The UHI effects reduced substantially at night, and even turned to be cold islands in some cities of the BTHUA and YRDUA. The agricultural lands also warmed the LST substantially during the daytime, especially in the BTHUA. Whereas they cooled the LST obviously at night for the BTHUA and YRDUA, with annual mean intensity of 2.3 °C and 0.7 °C, respectively. Although the urban lands had greater warming potentials, the agricultural lands dominated the regional temperature changes due to their larger area share. The urban and agricultural lands together warmed the daytime LST in all urban agglomerations, with the greatest LST increase in the BTHUA (4.0 °C), and cooled the LST at night for the BTHUA and YRDUA. Also, this study indicated that the surface thermal environmental effects of urban and agricultural lands varied greatly with the space and time. They were mainly controlled by vegetation activities, surface albedo, background climate, and population density. Our results provide important insights for formulating local land use strategies to mitigate climate change.

**Key Words:** land use activity; urban heat island; agriculture; thermal environmental effect; urban agglomeration

人为土地利用活动正以前所未有的速度改变局地、区域甚至全球气候,是除温室气体排放外,全球气候变化最重要的人为因子<sup>[1]</sup>。其中,城市化和农业是最主要的人为土地利用活动,可以通过改变下垫面的生物物理属性和状态如地表反照率、粗糙度、土壤湿度和热储量等显著改变区域气候<sup>[2]</sup>。城市快速扩张导致以自然植被为主的景观逐渐被高储热、低潜热的人工建筑取代<sup>[3]</sup>,进而导致城市温度高于郊区,形成城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)。例如,赵安周等<sup>[4]</sup>发现京津冀 13 个城市主城区白天和夜晚的地表热岛强度分别达 2.6°C 和 1.9°C; Zhou 等<sup>[5]</sup>发现长三角城市群县级以上城市平均热岛强度达 2.6°C; 贺丽琴等<sup>[6]</sup>发现珠三角城市群 7 月热岛效应最强,其中广州和佛山市最强可达 5.8°C。农业作为城市用地周围更广泛的土地利用活动,可通过农田管理<sup>[7-8]</sup>和改变下垫面性质<sup>[9]</sup>,显著影响区域气候,其影响甚至超过城市热岛效应<sup>[10]</sup>和温室气体排放的影响。农田管理如施肥、灌溉、松土和种植密度等均对气候产生影响。由于城市扩张通常以侵占农田为代价,对比研究二者对区域气候的影响,是准确评估人类土地利用活动区域气候效应的前提。

城市群作为当前我国城市发展的主要特征,是人类活动最为剧烈的区域,也是气候变化研究的热点区域<sup>[11-14]</sup>。城市群是由一个特大城市为核心和至少 3 个以上大城市为基本单元,构成的一组空间组织紧密和经济联系密切的城市群体<sup>[15]</sup>。与单个城市相比,城市群由于城市之间边界模糊或消失,可导致不同城市土地利用活动的气候效应相互耦合,形成空间连续的气候变化分布格局。然而过去研究大多关注大城市的热岛效应,忽略了周围农业活动气候效应以及中小城市的热岛效应<sup>[16]</sup>。一方面,这可能极大的低估大城市的热岛效应强度。例如, Zhou 等<sup>[5]</sup>以长三角城市群为例,发现传统的城郊温差法(即忽略周围土地利用的地表热环境效应)将导致地表城市热岛效应强度低估 60%以上,而且完全不能表征不同城市热岛强度的分布特征。另一方面,仅关注大城市的热岛效应不能全面的反映城市土地利用的气候效应,更不能揭示人类土地利用活动对区域气候的整体影响。实际上,中小城市的总用地面积和人口数量均远超过大城市<sup>[17]</sup>; Shi 等<sup>[18]</sup>以我国华北平原为例,发现农田灌溉的降温效应可以完全抵消城市的热岛效应。因此,急需从城市群尺度全面评估城市与农业土地利用的气候效应。

本文以卫星遥感获取的地表温度数据(Land Surface Temperature, LST)为基础,以我国最具代表性的三大城市群(京津冀、长三角、珠三角)为研究区。基于广泛采用的“空间代替时间”的研究思路<sup>[5,9-10]</sup>,发展适用于城市群尺度土地利用地表热环境效应评估新方法,旨在全面揭示人类主要土地利用活动(城市与农业)对城市群地区温度的影响及其地区差异。进而结合气候和生物物理因子数据,探讨城市与农业土地利用气候效应的驱动因子。本文选取的三个城市群分别位于南亚热带湿润区、北亚热带湿润区和温带半湿润区,这将有助于对比分析不同气候背景条件下人类土地利用活动气候效应差异。本文研究结果对区域气候变化评估以及适

应与缓解策略制定具有重要科学指导意义。

### 1 数据与方法

#### 1.1 研究区域

京津冀、长三角和珠三角城市群是我国发展最成熟、规模最大的 3 个城市群(图 1)。京津冀城市群主要包括北京、天津和河北省 11 个地级市,总面积 21.72 万 km<sup>2</sup>,属于温带季风气候。2015 年人口达 1.1 亿,占全国总人口的 8.0%,国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)达 6.94 万亿元,占全国的 10.1%。长三角城市群范围按照 2016 年 6 月国务院发布的《长江三角洲城市群发展规划》划分,主要包括上海市、江苏东南部、浙江北部和安徽东部共 26 市,总面积 21.17 万 km<sup>2</sup>,属于亚热带湿润季风气候,2015 年人口为 1.29 亿,占全国总

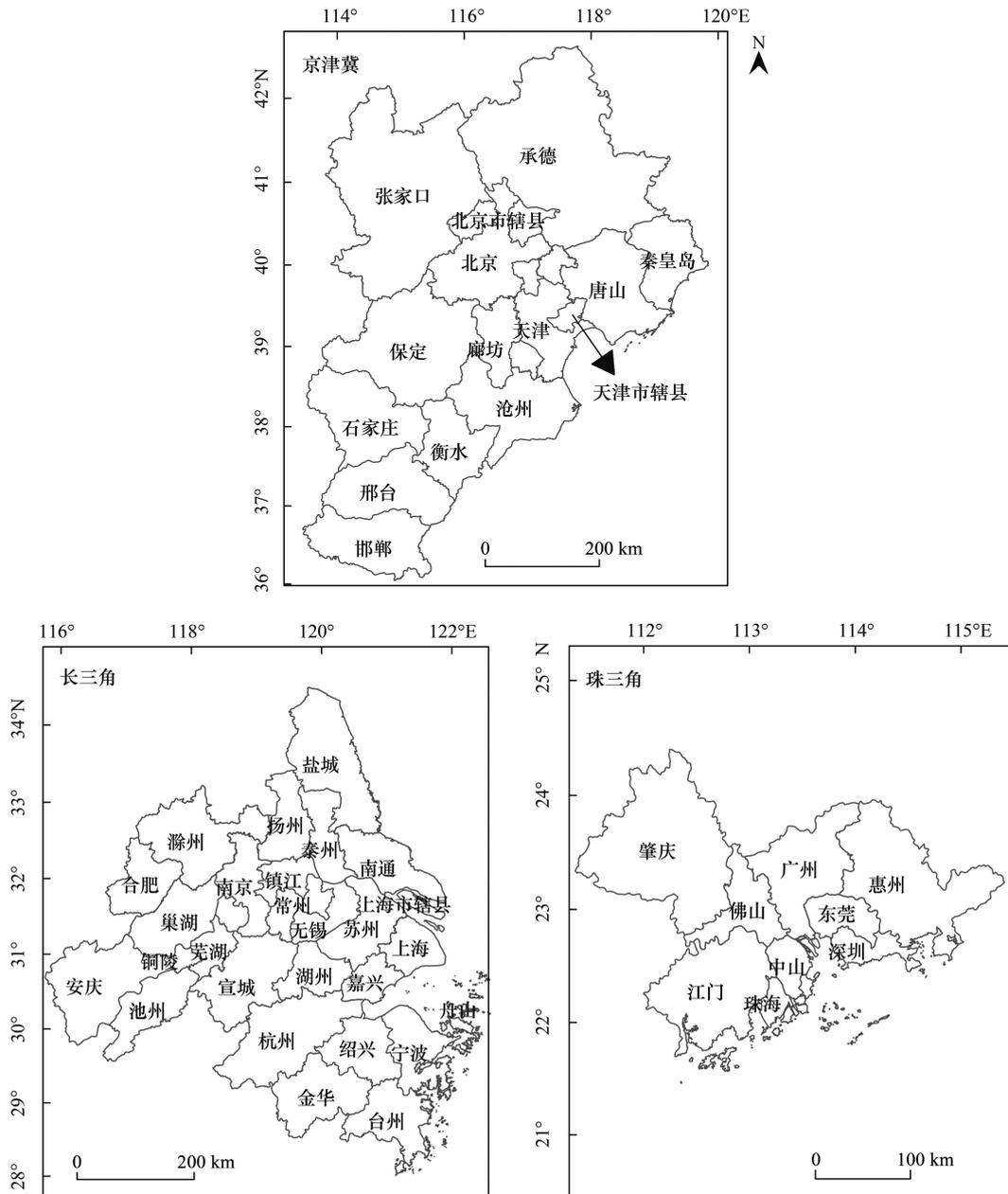


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area

人口的 9.38%, GDP 总量达 13.55 万亿元, 占全国的 19.8%。珠三角城市群主要包括广州、深圳、佛山、东莞、中山、惠州、珠海、江门、肇庆 9 个城市, 总面积 5.48 万 km<sup>2</sup>, 属于亚热带湿润季风气候。2015 年人口达 0.32 亿, 占全国总人口的 2.33%, GDP 总量达 6.23 万亿元, 占全国的 9.1%<sup>[19]</sup>。

## 1.2 数据来源与预处理

本文采用的温度数据来源于 Aqua 中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 最新版本的 8 天合成地表温度产品 (MYD11A2, V6), 空间分辨率为 1km。数据通过 Earthdata 数据共享平台免费获取 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)。MODIS 地表温度采用分裂窗口算法反演得到, 其误差大多数情况小于 1K<sup>[20]</sup>, 被广泛应用于地表热环境研究<sup>[21-23]</sup>。Aqua 卫星过境时间为当地太阳时 13:30 和 01:30, 此时地表温度分别接近日最高值和最低值, 分别代表白天和夜晚地表温度。为了减少误差, 本文提取平均发射率误差 ≤ 0.02 (质量控制 (QC) 标志为“01”) 和平均 LST 误差 ≤ 1K (QC 标志为“00”) LST 的数据。同时, 为了降低气候年际波动对 LST 值的影响, 研究采用 2016—2018 年 3 年平均值表征研究区 LST 的整体特征, 进而基于 8 天合成数据计算逐月平均 LST 温度。

土地利用数据来源于清华大学宫鹏等研发的 FROM-GLC 土地覆盖产品 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc2017v1.html>)。本文选取了 2017 年覆盖研究区的土地利用数据 (图 2), 数据分辨率为 30m, 包括耕地、草地、灌丛、林地、湿地、水体、不透水面和裸地八种土地利用类型。因水体白天冷却效应和夜晚增暖效应可能影响周围温度<sup>[24]</sup>, 本文剔除了水体和大型水体 (面积大于 60km<sup>2</sup>) 周围 1km 范围内的土地利用数据。为了使土地利用数据与 MODIS LST 数据的分辨率匹配, 本文计算了 1km 分辨率的耕地和不透水面的面积百分比, 同时剔除了二者面积百分比之和小于 67% 的像元, 因为这部分像元地表温度可能主要受其它土地利用类型 (如林地和草地) 控制。进而根据不透水面和耕地面积比例将土地利用划分为 3 大类: 城市用地 (不透水面面积百分比大于 67%), 农业用地 (耕地百分比大于 67%) 和混合用地 (其它)。如图 3 所示, 京津冀和长三角地区的土地利用类型以农业为主, 分别占 36.4% 和 29.4%, 而珠三角地区农业面积占比小, 仅为 3.8%, 三大城市群城市用地占比分别为 2.5%、4.1% 和 4.2%, 高于全国和全球平均城市用地比例<sup>[25]</sup>。

## 1.3 城市和农业用地地表热环境效应 ( $\Delta T$ ) 估算方法

本文将土地利用的地表热环境效应定义为每个像元实际地表温度与自然植被覆被条件下的参照温度之差:

$$\Delta T = \text{LST}(x, y, z) - T_r(x, y, z) \quad (1)$$

式中,  $(x, y, z)$  代表像元的经度、纬度和海拔,  $T_r$  代表参照的温度,  $\Delta T$  为正值表示增温效应, 负值表示降温效应。LST  $(x, y, z)$  可以通过 MODIS 地表温度直接提取。  $T_r$  则基于城市和农业用地周围自然植被 (林地) 的地表温度数据, 采用协同克里金插值方法获取, 具体方法如下:

1) 计算 1km 林地面积百分比, 并将林地百分比大于 90% 的像元定义为天然林地像元, 用以估算参考温度。为了增加自然植被的空间覆盖率, 还应包括位于城市群边界 50km 缓冲区的林地像元 (京津冀设置了 250km 缓冲区)。同时剔除水体及周围 1km 的缓冲区域的林地像元。

2) 将选取的天然林地像元导入 Google Earth Pro 软件, 通过与高分辨率遥感图像对比, 删除城市绿地像元。最终京津冀、长三角、珠三角城市群分别选取了 43337、54921、30544 个天然林地像元。

3) 提取所有林地像元的地表温度和地理位置信息 (经度、纬度和海拔), 海拔数据来源于先进的星载热发射和反射辐射仪 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER) 全球数字高程模型 (Global Digital Elevation Model, GDEM)<sup>[26]</sup>。

4) 利用协同克里金插值方法, 以海拔为协变量, 插值获取逐月  $T_r$  数据。

5) 基于算式 (1) 计算城市和农业用地的地表热环境效应 ( $\Delta T$ )。

## 1.4 $\Delta T$ 的时空格局及驱动因子分析方法

本文首先计算了白天和夜晚各城市群内城市和农业用地年均  $\Delta T$  以及各个地级以上城市的平均强度, 用

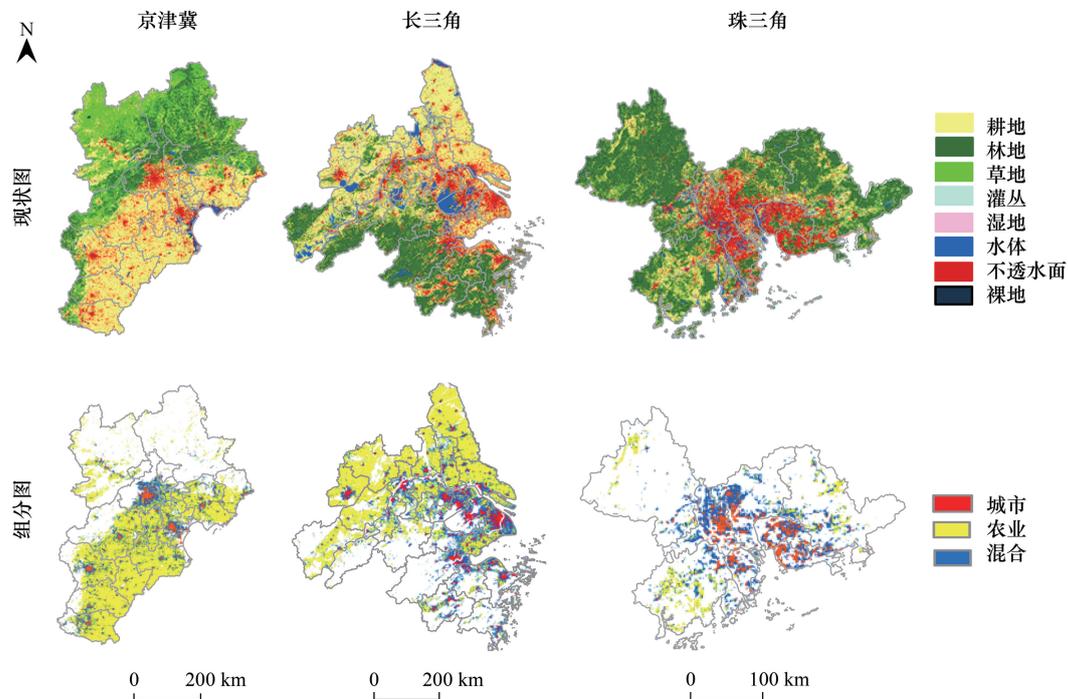


图2 京津冀、长三角和珠三角城市群的土地利用现状图和组分图

Fig.2 The 30 m Land use map and 1 km land use composition data in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTHUA), Yangtze River Delta (YRDUA), and Pearl River Delta (PRDUA)

以对比分析不同城市群  $\Delta T$  的空间分布特征。进而逐月计算了各城市群内城市与农业用地的平均  $\Delta T$ , 以分析  $\Delta T$  的季节变化特征。最后通过面积加权平均法, 估算了城市和农业用地对各城市群地表温度的整体贡献。

为了研究地表温度变化可能的原因, 本文搜集了增强型植被指数 (Enhanced vegetation Index, EVI)、白空反照率 (White sky albedo, WSA)、蒸散 (Evapotranspiration, ET)、气候背景 (温度和降水) 和人口密度数据。其中 ET 来源于 2016—2018 年 Aqua MODIS 8 天合成产品 (MYD16A2, V6, 分辨率为 500m), 该产品基于改进 Penman-Monteith 方程, 利用每日气象再分析数据以及 MODIS 遥感数据产品 (如植被特性、反照率和土地覆盖) 计算得到。EVI 为 2016—2018 年 Aqua MODIS 16 天合成产品 (MYD13A2, V6, 分辨率为 1km), 与归一化植被指数相比, EVI 增加了蓝色波段, 能较大限度地减少了冠层土壤背景的影响, 提高了对密集和稀疏植被的敏感性, 更适用于标准城市植被活动强度。WSA 来源于 MODIS 全球无缝填充逐日地表反照率产品 (MCD43GF, V6, 分辨率为 1km), 该产品包括黑空反照率 (Black sky albedo, BSA) 和白空反照率 (WSA), 由于 BSA 与 WSA 高度线性相关, 因此本文仅采用 WSA。上述 3 个因子均采用与  $\Delta T$  相同的方法, 计算其与参照条件的差值 ( $\Delta EVI$ 、 $\Delta WSA$  和  $\Delta ET$ ), 并汇总到月尺度。降水和温度数据来源于 WorldClim 2.0, 空间分辨率约 1km<sup>[27]</sup>。人口密度数据来源于哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心 (Center for International Earth

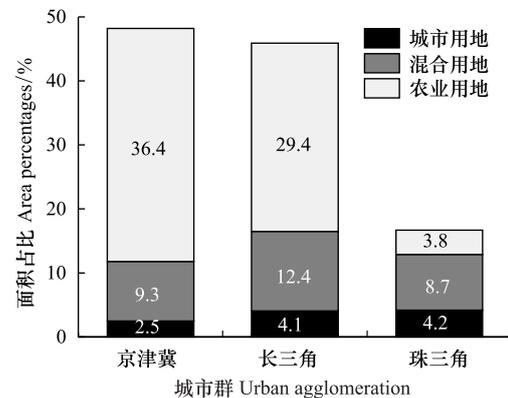


图3 不同土地利用组分类型占研究区总面积的百分比

Fig.3 Percentages of the study area for different land use compositions

Science Information Network, CIESIN)研发的2015年第四代世界人口格网数据(GPWv4)。最后,逐月计算 $\Delta T$ 与这六个变量的皮尔逊相关系数( $r$ ),分析 $\Delta T$ 变化与各驱动因子的关系。

## 2 结果

### 2.1 城市和农业用地 $\Delta T$ 空间分布特征

城市用地年均 $\Delta T$ 空间格局如图4所示,结果表明,白天3个城市群的城市用地均表现为明显的热岛效应,所有地级以上城市的平均热岛强度达 $3.2^{\circ}\text{C}$ 以上,珠三角的东莞市强度最大,超过 $6^{\circ}\text{C}$ ,且各城市群的最强热岛效应均未发生在核心城市。京津冀城市群形成了以北京和天津为中心的两个明显高温区;长三角地区则形成上海-苏州-无锡-常州连续高温分布带;珠三角地区的东莞-广州-佛山热岛群尤为明显。整体上,珠三角的城市热岛效应最明显,平均强度达 $5.5^{\circ}\text{C}$ ,其次是长三角( $4.4^{\circ}\text{C}$ ),京津冀地区最低。

对比之下,夜晚各城市群的热岛强度均明显降低,所有城市的平均热岛强度均小于 $1.6^{\circ}\text{C}$ 。京津冀地区各

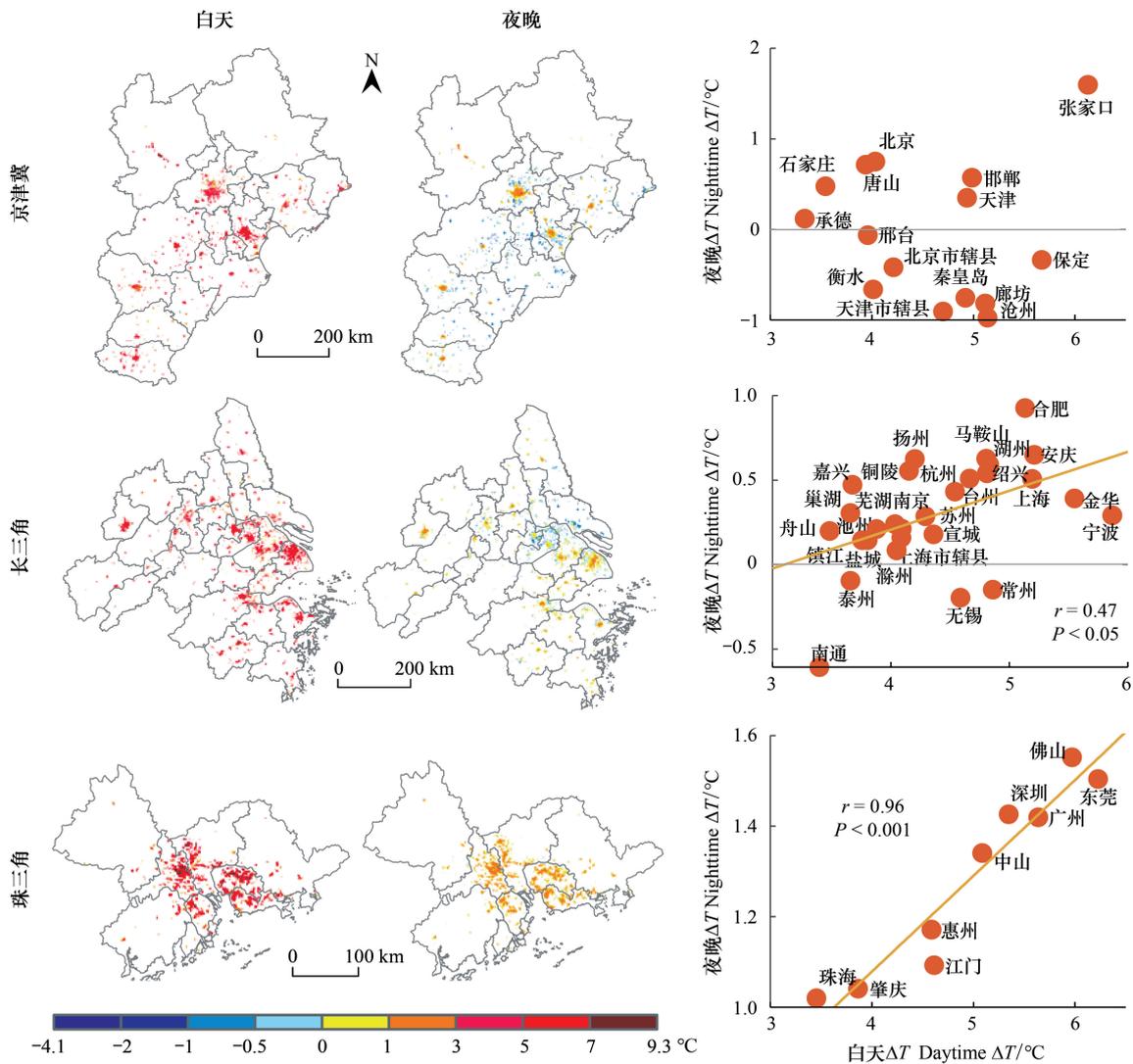


图4 京津冀、长三角和珠三角城市群城市用地白天和夜晚年均 $\Delta T$ 分布图及各地级以上城市的年均 $\Delta T$

Fig.4 Spatial distribution of the annual mean  $\Delta T$  of urban lands during the daytime and nighttime in the BTHUA, YRDUA and PRDUA, and their mean  $\Delta T$  of cities above the prefectural level

$\Delta T$ : 地表热环境效应

城市核心区仍为增温效应,但城郊区域表现为降温效应,整体导致京津冀地区 50%的城市表现出微弱的冷岛效应,长三角地区也有少部分城市表现微弱的冷岛效应,如南通、无锡和常州。与白天类似,夜晚珠三角的平均热岛强度最大(1.3℃),其次是长三角(0.2℃),京津冀地区最低(0.1℃)。整体上,各城市白天与夜晚热岛效应在珠三角( $r = 0.96, P < 0.001$ )和长三角( $r = 0.47, P < 0.05$ )地区呈显著的正相关关系,在京津冀地区无相关性( $r = 0.02, P = 0.94$ )。

农业用地年均  $\Delta T$  空间格局如图 5 所示,结果表明,白天三大城市群地区农业用地均为增温效应,所有地级以上城市的平均增温强度达 0.5℃ 以上,其中京津冀的沧州和张家口市、珠三角的深圳市平均增温强度超过 5℃。京津冀地区各个城市(除天津和邢台)农业用地平均增温强度均大于 3℃,相反,长三角和珠三角(除深圳)各个城市的平均增温强度均小于 3℃。整体上,京津冀地区增温强度最大(4.0℃),其次是珠三角(2.3℃),长三角最弱(1.3℃)。

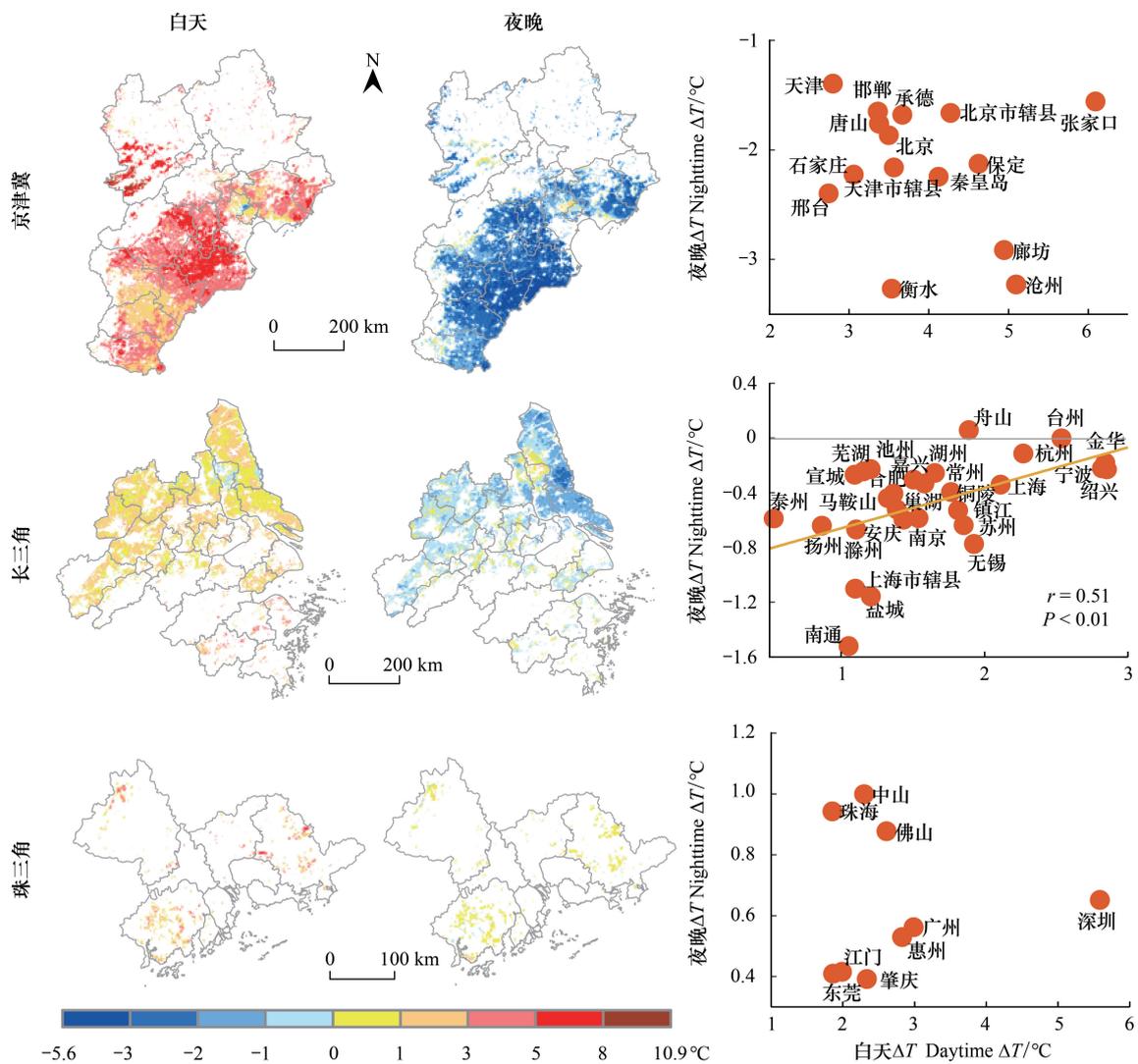


图 5 京津冀、长三角和珠三角城市群农业用地白天和夜晚年均  $\Delta T$  分布图及各地级以上城市的年均  $\Delta T$

Fig.5 Spatial distribution of the annual mean  $\Delta T$  of agricultural lands during the daytime and nighttime in the BTHUA, YRDUA and PRDUA, and their mean  $\Delta T$  of cities above the prefectural level

相比之下,夜晚珠三角农业用地仍为增温效应但强度明显减弱,而京津冀和长三角地区则是显著的降温效果,其中京津冀的衡水、沧州、廊坊等城市平均降温-3℃以上;京津冀地区平均降温强度(-2.3℃)远高于长

三角地区平均降温强度( $-0.7^{\circ}\text{C}$ )。整体上,京津冀和珠三角各城市白天和夜晚农田地表热环境效应无相关性,而长三角表现出正相关关系( $r = 0.51, P < 0.01$ )。

## 2.2 城市和农业用地 $\Delta T$ 季节变化特征

各城市群的平均  $\Delta T$  季节变化明显,尤其在白天(图6)。具体而言,白天3个城市群城市用地全年均表现为增温效应,夏季热岛强度明显高于冬季,京津冀、长三角和珠三角的最高强度分别达( $7.0 \pm 2.2$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、( $7.0 \pm 1.9$ ) $^{\circ}\text{C}$ 和( $7.5 \pm 2.8$ ) $^{\circ}\text{C}$ 。但不同城市群热岛的季节变化幅度差异较大,京津冀地的季节变化幅度最大,最高和最低热岛强度差异达  $5.7^{\circ}\text{C}$ ,其次是长三角。农业用地  $\Delta T$  的季节变化除京津冀地区外,相对较小,特别是珠三角地区无明显季节变化趋势。混合用地的热效应整体介于城市和农业用地之间。

相对而言,夜晚城市用地  $\Delta T$  的季节变化相对较小,整体上夏季大于冬季,其中京津冀地区在11—12月表现出明显的冷岛效应,长三角地区冬季热岛效应不明显。与白天相似,夜晚长三角和珠三角地区农业用地  $\Delta T$  季节变化相对较小。其中,珠三角地区全年均表现为增温效应,但增温幅度明显低于白天;长三角地区除夏季表现为微弱的增温效应外,春秋季节具有明显的降温效应,这可能与长三角地区双季作物有关;京津冀地区农业用地  $\Delta T$  季节变化大,除7月份表现为微弱的增温效应外,均表现为降温效应,其中12月降温强度最高达( $3.9 \pm 1.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 。

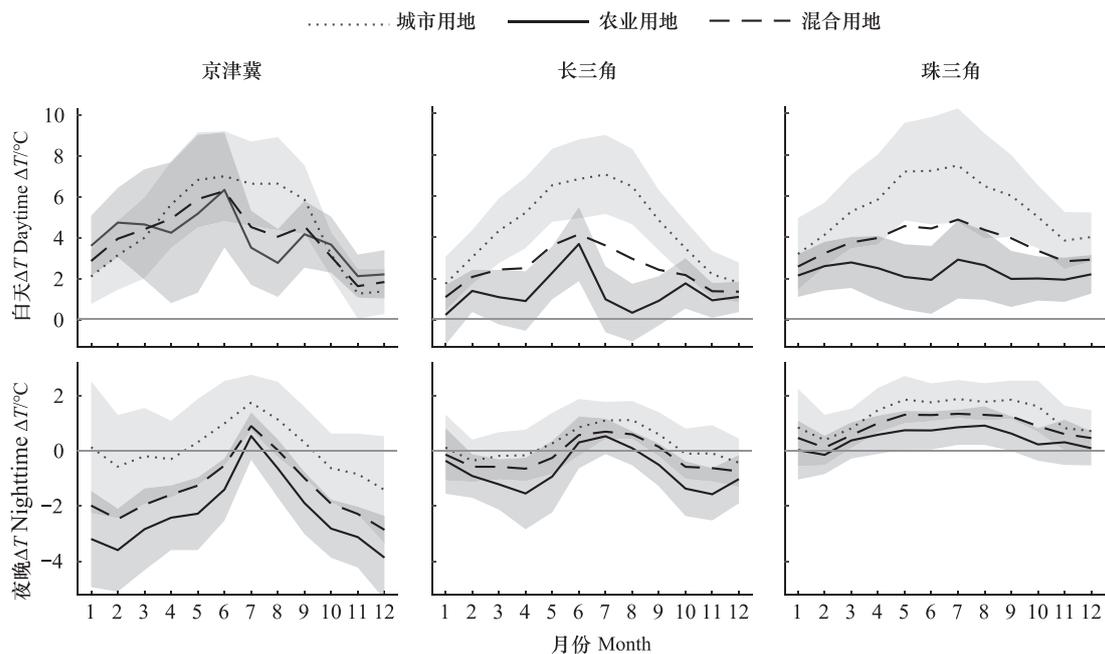


图6 京津冀、长三角和珠三角城市群城市和农业用地白天和夜晚  $\Delta T$  的月变化图

Fig.6 Monthly changes of  $\Delta T$  in urban and agricultural lands in the BTHUA, YRDU and PRDU during the daytime and nighttime

阴影表示1倍标准差

## 2.3 城市和农业用地联合地表热环境效应

通过计算各月份城市和农业用地的联合气候效应(图7)表明,三大城市群地区二者的联合地表热环境效应主要受农业用地的控制,其变化的幅度及其季节变化特征整体与农业用地相似。具体而言,白天三大城市群联合效应均为增温效应,京津冀平均增温强度最大,达  $4.0^{\circ}\text{C}$ ,其次是珠三角( $3.8^{\circ}\text{C}$ ),长三角最低( $1.9^{\circ}\text{C}$ );从季节来看,白天各城市群夏季增温强度最大,冬季最弱,其中京津冀地区最高和最低强度差异可达  $4.2^{\circ}\text{C}$ 。与白天不同,城市和农业用地整体导致京津冀和长三角地区夜晚温度降低,冬季降温效应尤为显著,最大降温幅度分别可达  $-3.5^{\circ}\text{C}$ 和  $-1.2^{\circ}\text{C}$ ,但在珠三角地区,二者整体仍表现为增温效应(平均增温  $0.9^{\circ}\text{C}$ );就年均水平而言,京津冀和长三角夜晚降温分别达  $-2.0^{\circ}\text{C}$ 和  $-0.5^{\circ}\text{C}$ 。

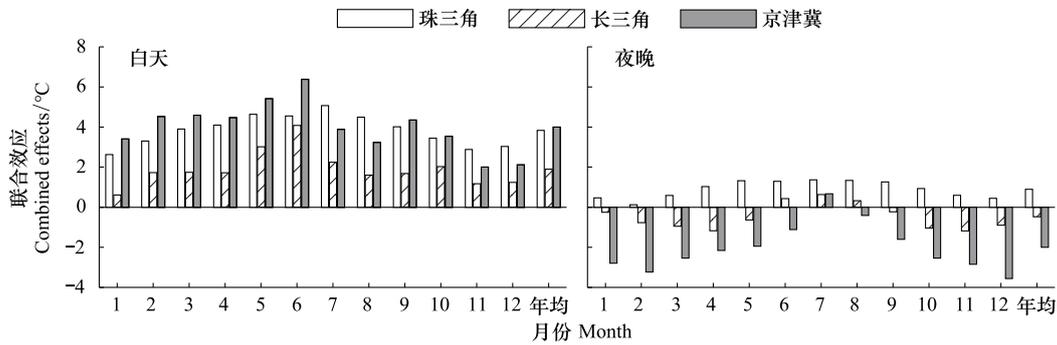


图7 城市和农业用地对京津冀、长三角和珠三角城市群地表温度的联合效应

Fig.7 Combined effects of urban and agricultural lands on land surface temperature in the BTHUA, YRDUA and PRDUA

2.4 城市和农业用地  $\Delta T$  空间变化与驱动因子之间的关系

如图4和图5所示,各城市群内部  $\Delta T$  的空间异质性极大,为了探究  $\Delta T$  空间变化的可能驱动因子,本文分别计算了各个城市群地区  $\Delta T$  和6个驱动变量的皮尔逊相关系数( $r$ )。结果如图8所示,白天三大城市群的  $\Delta T$  的空间变化与  $\Delta EVI$  和  $\Delta ET$  呈显著负相关关系;其中,珠三角城市群的负相关关系尤为显著,  $\Delta T$  与  $\Delta EVI$  和  $\Delta ET$  各月均表现为负相关关系,平均  $r$  达到  $-0.68 (P < 0.001, N = 40360)$  和  $-0.63 (P < 0.001, N = 38838)$ ;京津冀和长三角地区的  $\Delta T$  在生长季内与  $\Delta EVI$  和  $\Delta ET$  呈显著负相关关系,但在冬季负相关不明显或呈现弱正相关关系。与此同时,三大城市群的  $\Delta T$  与温度、 $\Delta WSA$  和人口密度整体呈正相关关系;与降水关系随不同季节差异较大,京津冀和长三角夏季整体表现为负相关关系,珠三角冬春季节整体表现为负相关关系。

与白天类似,夜晚3个城市群的  $\Delta T$  与  $\Delta EVI$  和  $\Delta ET$  均呈显著负相关,与人口密度整体呈显著正相关关系,与降水和温度的关系随不同月份变化较大。有趣的是,京津冀和长三角地区  $\Delta T$  与  $\Delta WSA$  整体呈显著的负相关关系,年均  $r$  分别为  $-0.55$  和  $-0.51 (P < 0.001)$ ,而在珠三角地区整体表现为微弱的正相关关系。

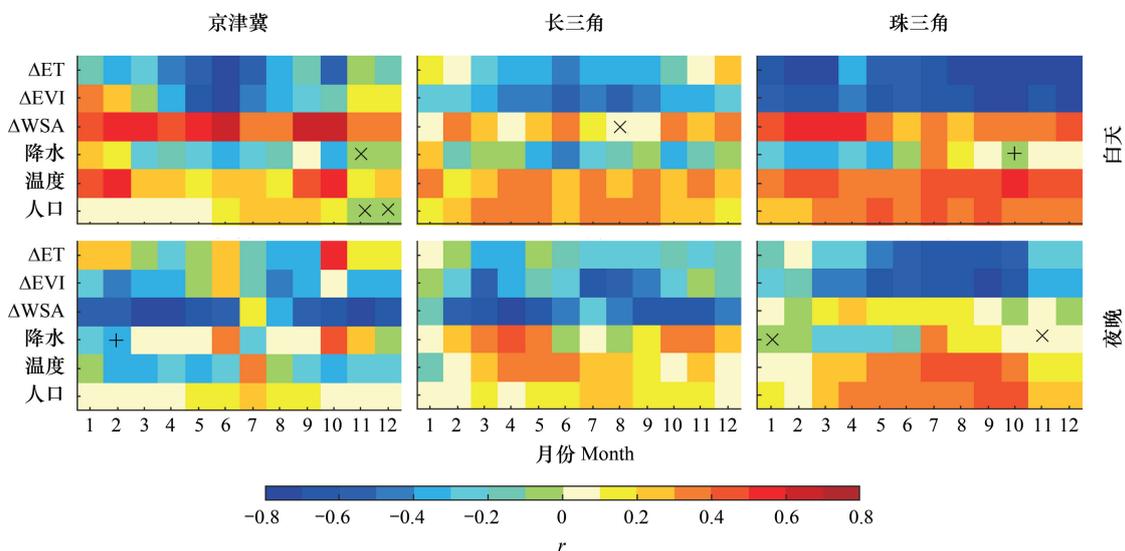


图8 京津冀、长三角和珠三角城市群白天和夜晚各月  $\Delta T$  和驱动因子

Fig.8 The Pearson's correlation coefficients ( $r$ ) between the  $\Delta T$  and driving variables

$\Delta ET$ 、 $\Delta EVI$ 、 $\Delta WSA$ 、降水、温度和人口密度的皮尔逊相关系数( $r$ ); $\times$ 表示不显著,+表示在0.05水平显著,其余在0.001水平显著;EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation Index;WSA: 白空反照率 White sky albedo;ET: 蒸散 Evapotranspiration

### 3 讨论

#### 3.1 不同城市群地区城市和农业用地地表热环境效应差异及其驱动机制

研究结果表明城市化有明显的热岛效应(图 6),且三大城市群地区的热岛效应均呈现出夏季大于冬季特征,这与先前一些研究结果一致<sup>[4,24,28]</sup>。城市化导致城市不透面比例增加,进而降低潜热通量和增加储热,是导致城市热岛效应的主要原因<sup>[16,21]</sup>。从地区来看,珠三角地区城市热岛效应平均强度最大,京津冀地区最低,这主要受气候背景的控制<sup>[29-30]</sup>。例如,地处亚热带湿润地区的珠三角地区,降雨相对充足,且温度较高,导致其天然林地的蒸散较高,致使城市化产生较强的热岛效应。与过去研究结果<sup>[30-31]</sup>有所不同的是,本文发现三个城市群白天热岛效应强度均明显大于夜晚,这可能与研究方法差异有关。过去研究多以城市周围缓冲区的农业用地为参照,本文以天然林地作为参照,而林地相对于农业用地的储热能力相对较强,导致林地夜晚温度较高,进而导致较低热岛效应强度。本文还发现,夜晚京津冀地区在冬季有明显的冷岛效应,这可能与地表反照率变化和大气污染有关。

与此同时,本文发现农业用地在白天也表现出明显的增温效应,尤其在夏季,但夜晚除珠三角地区外均表现为降温效应,这与先前关于森林砍伐气候效应研究结果一致<sup>[9]</sup>。农业用地相对林地具有较低的潜热通量和储热能力,是导致其白天增温效应的和夜晚降温效应的主要原因<sup>[32]</sup>。珠三角地区夜晚农业用地仍表现为增温效应,可能是由于较高的温度导致夜晚林地具有一定的潜热通量所致<sup>[9]</sup>。与过去研究结果不同的是,本文发现在白天京津冀地区农业用地的增温效应最明显,这可能与农田管理和作物类型有关。例如,京津冀地区多以旱地为主,受水分限制,其潜热通量相对较低,而南方地区多以稻田为主。整体上,农业用地的增温效应低于城市用地的增温效应,这主要是由于农业用地相对于城市,因作物生长和农田管理,其潜热通量相对较大<sup>[32]</sup>。但京津冀地区冬季白天农业增温大于城市热岛效应,这可能是由于京津冀冬季农田大部分为裸露干燥或冰雪覆盖的地表,地表反照率高所致<sup>[24]</sup>。

整体上,本文发现城市用地虽然具有较高的增温强度(图 6),但农业用地因面积的绝对优势(图 3),对各城市群地区地表热环境起控制作用,特别是在京津冀和长三角地区(图 7),这强调了农业用地在区域土地利用气候效应评估的重要性。本文发现各城市群地区白天的年均增温强度( $> 1.9^{\circ}\text{C}$ )远高于工业革命以来观测到的全球气温变化幅度<sup>[1]</sup>。这说明在评估人类活动对气候变化影响以及制定相应的缓解和适应策略时,除了考虑温室气体的排放外,同时要重视土地利用的生物物理气候效应,特别是在人类土地利用活动强度较高的城市群地区。但在京津冀和长三角地区,白天超过一半的增温效应被夜晚的降温效应所抵消,从而极大的缓解人为土地利用对区域温度的影响(图 7);而珠三角地区因夜晚同样具有增温效应,导致其成为人为土地利用日均增温效应最明显的地区。

另外,研究结果表明各个城市群内部城市和农业用地的地表热环境效应( $\Delta T$ )时空异质性极大(图 4 和图 5),最高最低温差可能超过  $10^{\circ}\text{C}$ ,说明了土地利用的地表热环境效应的复杂性以及基于高时空分辨率数据评估土地利用气候效应的重要性。通过进一步的驱动因子分析,结果表明  $\Delta T$  与植被指数(或蒸散)在不同城市群、不同时间及季节均呈显著的负相关关系(图 8),强调了潜热通量在区域土地利用生物物理气候效应中的控制作用<sup>[33]</sup>。地表反照率作为控制地表温度另一个关键生物物理因子,可通过减少地表能量输入,降低地表温度<sup>[16]</sup>,这一驱动机制在京津冀和长三角地区的夜晚表现的尤为明显(图 8)。意外的是,在白天以及珠三角的夜晚, $\Delta T$  与地表反照率均呈显著正相关关系,这与上述驱动机制矛盾。导致这种现象的可能原因是地表反照率的影响被蒸散强烈作用所掩盖。同时,本文发现人口密度与  $\Delta T$  整体均呈显著的正相关关系,这与最近 Manoli 等<sup>[29]</sup>发现一致。人口增加,导致城市用地面积比例以及人为热排放增加,进而增加地表温度。相对而言,气候背景差异(降水和温度)与  $\Delta T$  的关系在不同时间以及城市群之间差异较大,这可能是由于城市群内部气候条件差异较小的缘故。这说明,气候背景差异虽然是控制大尺度土地利用气候效应的主控因子<sup>[29-30]</sup>,但在区域尺度,土地利用气候效应差异主要受地表生物物理特征差异的控制。

### 3.2 优势与不足

本文有助于加深对城市群地区人类土地利用活动气候效应的系统认识,并具有重要应用价值。首先,本文为区域尺度土地利用地表热环境效应的评估提供新的方法参考。本文以天然林地为参照,基于协同克里金插值法估算参考温度,可以有效避免传统以郊区或农田为参照的局限性。该方法不仅能够评估农业土地利用的气候效应,还可以更加全面、客观的评估城市热岛效应。其次,本文提供了深入研究人类土地利用活动气候效应的可能方向。本文结果强调了农业土地利用对区域热环境变化的控制作用,说明未来城市群地区气候变化以及城市热岛效应评估必须考虑农业活动的影响。同时,本文发现所有城市群地区的最高热岛效应强度并未发生在核心城市,这说明仅关注大城市热岛效应不能准确反映城市群地区热岛效应的格局,未来城市热岛效应研究应加强对城市群热岛效应的整体评估。第三,本文为相关政策制定提供决策支持。例如,研究结果表明地表温度变化主要受潜热通量的控制,说明在制定气候变化缓解策略过程要优先考虑调整地表蒸散能力,如增加植被覆盖度和加强灌溉等。

本文仍存在不确定性。首先,本文是基于天然林地像元点提取的 LST 数据进行空间插值,预测参考温度,而我国地形复杂,天然林地分布不均匀,缺乏林地像元的区域插值拟合的结果可能存在偏差。例如,珠三角地区林地分布较均匀,但京津冀地区林地主要分布在北部和西部,长三角地区主要分布在南部和西南部。其次,据政府间气候变化专门委员会第五次评估报告中指出,人类活动排放的温室气体会导致全球平均温度升高<sup>[1]</sup>,而本文并未探讨与土地利用相关的温室气体排放。最后,不同驱动因子之间可能存在多重共线性问题,这需要多种统计技术来验证驱动力的可靠性和解释能力。

## 4 结论

本文基于多源遥感数据,对比分析了我国规模最大的 3 个城市群地区城市和农业用地的地表热环境效应及其驱动因子。结果发现三大城市群地区城市用地均导致明显的城市热岛现象,城市群内近邻不同城市形成明显的热岛群,其中京津冀地区形成北京和天津两个高温区,长三角地区形成上海-苏州-无锡-常州连续高温带,珠三角地区形成东莞-广州-佛山高温带。城市热岛季节变化特征明显,夏季明显大于冬季,白天明显大于夜晚,京津冀和长三角城市群的部分城市夜晚甚至出现冷岛效应,尤其京津冀城市群夜晚近一半城市表现为冷岛效应。对比之下,农业用地白天具有增温效应,尤其京津冀地区,夜晚珠三角仍为增温效应,但在京津冀和长三角地区降温作用明显,春冬两季降温效果尤为显著。整体上,夜晚京津冀和长三角地区农业用地的降温效应完全抵消了城市热岛效应,致使整个区域平均温度降低。本文仍存在一定不确定性,如参考像元分布不均和驱动因子多重共线性问题,需要更多的实地观测和数值模拟来验证遥感观测结果。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] IPCC. Summary for policymakers//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: IPCC, 2013.
- [ 2 ] Huang B, Hu X P, Fuglstad G A, Zhou X, Zhao W W, Cherubini F. Predominant regional biophysical cooling from recent land cover changes in Europe. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1066.
- [ 3 ] Qiao Z, Liu L, Qin Y W, Xu X L, Wang B W, Liu Z J. The impact of urban renewal on land surface temperature changes: A case study in the main city of Guangzhou, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 794.
- [ 4 ] 赵安周, 裴韬, 曹森, 张安兵, 范倩倩, 王金杰. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1825-1833.
- [ 5 ] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, Wang R H. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 415-429.
- [ 6 ] 贺丽琴, 杨鹏, 景欣, 晏磊, 苏琳琳. 基于 MODIS 影像及不透水面积的珠江三角洲热岛效应时空分析. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 140-146.

- [ 7 ] Yang Q Q, Huang X, Tang Q H. Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135984.
- [ 8 ] Nocco M A, Smail R A, Kucharik C J. Observation of irrigation-induced climate change in the Midwest United States. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3472-3484.
- [ 9 ] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E, Li S C. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, 6: 6603.
- [ 10 ] Zhou D C, Li D, Sun G, Zhang L X, Liu Y Q, Hao L. Contrasting effects of urbanization and agriculture on surface temperature in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9597-9606.
- [ 11 ] 刘勇洪, 房小怡, 张硕, 栾庆祖, 权维俊. 京津冀城市群热岛定量评估. *生态学报*, 2017, 37(17): 5818-5835.
- [ 12 ] 林中立, 徐涵秋, 陈弘. 我国东部沿海三大城市群热岛变化及其与城市群发展的关系. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1695-1704.
- [ 13 ] Chen M X, Zhou Y, Hu M G, Zhou Y L. Influence of urban scale and urban expansion on the urban heat island effect in metropolitan areas: Case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3491.
- [ 14 ] Yang J, Zhan Y X, Xiao X M, Xia J C, Sun W, Li X M. Investigating the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones. *Urban Climate*, 2020, 34: 100700.
- [ 15 ] 顾朝林. 城市群研究进展与展望. *地理研究*, 2011, 30(5): 771-784.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] United Nations Department of Economic and Social Affairs. *World urbanization prospects: The 2018 revision*. New York: United Nations, 2019: 55-79.
- [ 18 ] Shi W J, Tao F L, Liu J Y. Regional temperature change over the Huang-Huai-Hai Plain of China: The roles of irrigation versus urbanization. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1181-1195.
- [ 19 ] 国家统计局. *中国统计年鉴 2016*. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 邓玉娇, 王捷纯, 何全军, 陈蝶聪. 基于 MODIS 资料分析近 15 年广州城市热岛特征及演变规律. *热带气象学报*, 2018, 34(6): 755-762.
- [ 23 ] Qiao Z, Wu C, Zhao D Q, Xu X L, Yang J L, Feng L, Sun Z Y, Liu L. Determining the boundary and probability of surface urban heat island footprint based on a logistic model. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1368.
- [ 24 ] 陈彬辉, 冯瑶, 袁建国, 周一敏, 赵昕奕. 基于 MODIS 地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(6): 1134-1140.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] Tachikawa T, Hato M, Kaku M, Iwasaki A. Characteristics of ASTER GDEM version 2//*Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2011: 3657-3660.
- [ 27 ] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [ 28 ] Du H Y, Wang D D, Wang Y Y, Zhao X L, Qin F, Jiang H, Cai Y L. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 461-470.
- [ 29 ] Manoli G, Fatichi S, Schlöpfer M, Yu K L, Crowther T W, Meili N, Burlando P, Katul G G, Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573(7772): 55-60.
- [ 30 ] Zhou D C, Zhang L X, Li D, Huang D, Zhu C. Climate-vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074009.
- [ 31 ] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Otle 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*, 2012, 46(2): 696-703.
- [ 32 ] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 679.
- [ 33 ] Li D, Liao W L, Rigden A J, Liu X P, Wang D G, Malyshev S, Shevliakova E. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 2019, 5(4): eaau4299.