# DOI: 10.5846/stxb202205151368

梁洪武,阿里木江·卡斯木,张雪玲,赵永玉,如克亚·热合曼.干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素——以天山北坡城市群为例. 生态学报,2023,43(9):3650-3664.

Liang H W, KASIMU · Alimujiang, Zhang X L, Zhao Y Y, REHEMAN · Rukeya. Spatio-temporal change and influencing factors of land surface temperature in oasis urban agglomeration in arid region; A case study in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9):3650-3664.

# 干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素

——以天山北坡城市群为例

梁洪武<sup>1</sup>,阿里木江·卡斯木<sup>1,2,3,\*</sup>,张雪玲<sup>1</sup>,赵永玉<sup>1</sup>,如克亚·热合曼<sup>1</sup>

- 1 新疆师范大学地理科学与旅游学院,乌鲁木齐 830054
- 2 新疆师范大学丝绸之路经济带城镇化发展研究中心,乌鲁木齐 830054
- 3 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室,乌鲁木齐 830054

摘要:基于 2005—2019 年的 MYD11A2 时间序列 LST 遥感数据,首先采用均值标准差法对 LST 进行分级,分析了天山北坡城市群的 LST 空间分布格局;其次利用 Sen's 斜率分析法、Mann-Kendal 趋势检验法和 Hurst 指数揭示了天山北坡城市群 LST 在 2005—2019 年和未来的变化趋势;最后借助地理探测器模型并综合考虑地表覆盖、气候、社会经济和地形因素分析了多空间尺度下 LST 的主要影响因素。结果表明:(1)天山北坡城市群的吐鲁番市是高温(HT)和极高温(EHT)的主要集聚地;白天和夜间的 LST 格局差异大,在绿洲区域表现为典型的"昼冷岛,夜热岛"特征。(2) LST 在白天和夜间的变化率分别为 0.04 ℃/a 和 0.03 ℃/a,白天的升温幅度强于夜间;在乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、石河子市和五家渠市 LST 表现出显著的升高趋势,且在未来也具有相同的趋势。(3)在不同的空间尺度上,LST 的主要影响因素不同;从整个天山北坡城市群来看气候因素和地形因素是 LST 的主要影响因素,而在在石河子市、五家渠市和奎屯市 LST 的主要影响因素是社会经济因素。

关键词:地表温度;干旱区;天山北坡;城市群;影响因素

# Spatio-temporal change and influencing factors of land surface temperature in oasis urban agglomeration in arid region: A case study in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

LIANG Hongwu<sup>1</sup>, KASIMU · Alimujiang<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHANG Xueling<sup>1</sup>, ZHAO Yongyu<sup>1</sup>, REHEMAN · Rukeya<sup>1</sup>

- 1 School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China
- 2 Research Centre for Urban Development of Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China
- 3 Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China

**Abstract:** Based on MYD11A2 time series LST remote sensing data from 2005—2019, firstly, the LST was classified by the mean standard deviation method, and the spatial distribution pattern of LST in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains was analyzed. Secondly, Sen's slope analysis, Mann-Kendal trend test and Hurst index were used to reveal the changing trends of LST in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains from 2005—2019 and in the future. Finally, the main influencing factors of LST at multi-spatial scales were analyzed by the geographic detector model and comprehensively considering land cover, climate, socio-economic and topographic factors.

**基金项目:**第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0905);自治区创新环境(人才、基地)建设专项项目(2022D04007);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2022G209)

收稿日期:2022-05-15; 网络出版日期:2022-09-02

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: alimkasim@ xjnu.edu.cn

The results showed that: (1) Turpan City in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains was the main cluster area of high temperature (HT) and extremely high temperature (EHT). The LST patterns of daytime and nighttime were quite different. In the oasis area, it showed the typical characteristics of cool island in the daytime and heat island in the nighttime. (2) The warming rate of LST was stronger during the day than at night, with 0.04 °C/a and 0.03 °C/a during the day and night, respectively. In Urumqi City, Changji Hui Autonomous Prefecture, Shihezi City and Wujiaqu City, LST showed a significant increasing trend and had the same trend in the future. (3) The main influencing factors of LST were different at different scales. Climatic and topographic factors are the main influencing factors of LST from the scale of the whole urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains. From the city scale, the main influencing factors of LST in Shihezi, Wujiaqu and Kuitun cities are socio-economic factors.

**Key Words:** land surface temperature; arid area; northern slope of Tianshan Mountains; urban agglomeration; influencing factors

地表温度是(Land Surface Temperature, LST)影响陆地与大气间能量交换和水循环过程的关键因素,也是地表能量收支平衡的重要体现<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着全球城市化的不断推进,大量以水泥、沥青为主的不透水面破坏了原有的自然景观引起地表反照率和比辐射率等表面参数的变化,使得城市区域的 LST 变化尤为显著<sup>[3]</sup>。城市地表温度变化不仅会降低人们居住环境的舒适性,危害人类身体健康;还会对城市局部气候和生态环境演变等方面造成严重影响<sup>[4]</sup>。城市群是区域经济集聚、工业化和城镇化发展到一定先进程度的地域空间载体,其已成为当前全球城市化最显著的表现形式<sup>[5]</sup>。目前,中国已经形成多个大型城市群,如京津冀、长三角、珠三角和成渝城市群等,其已成为带动区域经济发展和城市化的主要载体。因此了解城市群 LST 的空间分布格局、变化趋势和主要影响因素,对于城市群的经济可持续发展和生态环境保护是非常有必要的。

目前,已有大量学者在 LST 的时空分布特征<sup>[6-7]</sup>和影响因素<sup>[8-10]</sup>等方面取得了丰硕的研究成果;大量空间计量模型<sup>[11-12]</sup>和景观生态理论<sup>[13-14]</sup>也被引入到 LST 的演变过程与作用机理的研究当中。根据现有的研究表明,地表覆盖被认为是影响 LST 的关键因素。例如,不透水面会增加地表的显热通量,使得地表向外的热辐射能增加,从而导致 LST 升高<sup>[15]</sup>。而水体和绿地是城市天然的散热器,植被通过蒸腾作用和阴影能够有效降低地表温度,水体能通过蒸散发带走大量热量,加上其较大的比热容从而能够保持较低的温度<sup>[16-17]</sup>。一些能准确表征地表覆盖信息的遥感光谱指数,如归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)和归一化建筑和裸土指数(Normalized differential build-up and bare soil index, NDBSI)等都与 LST 有显著的线性关系<sup>[18]</sup>。此外,一些地形因素、气候因素、人类活动和社会经济因素,也在影响城市 LST 变化的过程中起着不可忽视的作用<sup>[19]</sup>。例如,海拔与LST 呈显著的负相关关系<sup>[20]</sup>;人口密度、国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)和能够表征人类活动强度和社会经济状况的夜间灯光数据也与 LST 有着密切的关联<sup>[21]</sup>。近年来,相继有学者发现气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth,AOD)也与 LST 有着高度的相关关系<sup>[22]</sup>,然而,却较少有研究探讨 AOD 对 LST 影响,一些其他的气候因素,如降水也较少作为影响因素应用于 LST 的研究中。

在以往对LST 研究中,人们常常依赖于 Landsat 系列数据,基于某个或多个时间断面(传感器过境时刻),来分析LST 的空间分布格局。虽然 Landsat 数据空间分辨率较高,但时间分辨率较低,且常常被传感器过境时刻的云覆盖状况所限制,因此其难以对大范围LST 进行连续、稳定的观测。在对影响因素的研究中,也多以简单的线性回归模型<sup>[23]</sup>作为研究方法来探讨单个或多个影响因素对LST 影响。然而,简单的线性回归模型无法充分揭示各影响因素对LST 解释程度;且无法分析不同影响因素共同作用时对LST 的影响和影响因素之间的作用关系。此外,在影响因素的选择上,多偏好地表覆盖因素,缺乏对社会经济因素和气候因素的全面考虑。因此,本研究选用时间分辨率高且空间分辨率适中的 MODIS 数据,来探究LST 的空间分布格局和时空变化趋势;并综合考虑各方面影响因素,应用地理探测器模型(Geographic Detector Model, GDM)<sup>[24]</sup>深入探

究 LST 的相关影响因素。

天山北坡城市群地处我国西北的干旱和半干旱地区,其水资源严重匮乏,生态环境脆弱且对气候变化敏感,是典型的绿洲城市群<sup>[25]</sup>。天山北坡城市群是当前新疆城镇化水平最高、交通最发达、人口和产业最密集的地区,在新疆有着不可替代的作用<sup>[26]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来,由于城镇化的不断推进,大量生态用地转换为建设用地,绿洲—荒漠过渡带持续萎缩<sup>[27]</sup>。然而,改善生态环境质量,促进可持续发展转型,是当前中国政府较为关注的问题。因此,在激烈的人类活动的影响下,分析天山北坡城市群 LST 的空间分布格局、变化趋势以及探究其影响因素,对城市群布局未来发展规划和改善人居环境质量都具有十分重要的意义。

#### 1 研究区和数据源

#### 1.1 研究区概况

天山北坡城市群是我国西北内陆地区的一个新兴城市群,也是丝绸之路经济带核心区唯一的城市群<sup>[28]</sup>。 其地理位置介于 82°30′—91°30′E,39°40′—45°30′N,位于新疆天山北麓、淮噶尔盆地南缘,空间范围包括乌鲁木齐市、五家渠市、昌吉回族自治州、吐鲁番市、石河子市、克拉玛依市、奎屯市、乌苏市以及沙湾市(图 1)。天山北坡城市群是目前新疆最为发达的地区,也是未来引领新疆进行新型城镇化建设和社会经济发展的战略核心区,但由于其坐落在干旱区绿洲生态环境中,生态环境极易失衡。因此,为了改善天山北坡城市群生态环境质量,促进可持续发展转型,需要探究其各方面的存在生态环境问题,LST 作为生态环境中的一个重要参数,亟需要引起重视。然而,目前对城市群 LST 的研究中,还主要集中于沿海和发达地区的城市群,对于内陆干旱地区和欠发达地区城市群的关注度较低。

#### 1.2 数据来源和预处理

在本研究中,2005—2019年的LST数据采用MODIS Aqua LST产品 MYD11A2,该产品是由MODIS第31、32通道的热红外波段运用分裂窗算法计算所得,空间分辨率为1km。MYD11A2数据是由8d的晴空LST经过简单平均算法得到复合LST产品,能有效减少云量的影响。该产品已经过一系列精度验证,整体精度较高,已被广泛应用于区域或全球尺度的LST研究<sup>[29]</sup>。

在影响因素的选择时,根据先前的研究<sup>[19,21,30]</sup>和数据的可获得性,本研究综合考虑了地表覆盖因素、气候因素、地形因素以及社会经济因素,最终选择了土地利用/土地覆盖(Land Use/Land Cover, LULC)、NDVI、NDBSI、降水、AOD、夜间灯光、GDP、人口密度、DEM 和坡度。NDVI 和 AOD 数据分别来自 MODIS 的植被指数产品 MYD13A2 和陆地气溶胶光学厚度数据产品 MCD19A2。NDBSI 数据是基于 MODIS 地表反射率数据 MYD09A1 计算得到(具体计算方法见第 2.3 节)。GDP

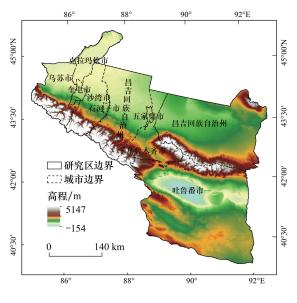


图 1 研究区示意图

Fig.1 Overview of study area

和人口密度数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)。土地利用/土地覆盖数据是由 Yang 等[31]生产的 1990—2019 的 30 m 逐年中国土地覆盖数据集,本研究将其重分类为耕地、林地、水域、草地、建设用地和未利用地共 6 种类型。降水数据来自于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)的逐月降雨量栅格数据,本研究计算了其年平均值。夜间灯光数据是由美国科罗拉多矿业大学校正合成后的月度 NPP—VIIRS 夜间光数据。DEM 和坡度数据来自于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。为保证所有的数据空间分辨率—致,所有数据均重采样为 1 km。表 1 总结了所有影响因素数据的

详情。

由于4种 MODIS 数据(LST、NDVI、NDBSI、AOD)和夜间灯光数据总量已经超过1000幅遥感影像,数据量庞大,因此本研究借助遥感云计算平台 Google Earth Engine(GEE)来完成数据的筛选和计算等一系列工作。

# 表 1 影响因素详情和数据来源

Table 1 Details and sources of influencing factors

影响因素类型 Types of influencing factors	影响因素 Influencing factors	分辨率/m Resolution	时间 Time	获取途径 Access		
地表覆盖因素	LULC	30	2019	https://zenodo.org		
Land cover factors	NDVI	1000	2019	GEE		
	NDBSI	500	2019	GEE		
气候因素	降水	1000	2019	http://data.tpdc.ac.cn		
Climate factors	AOD	1000	2019	GEE		
社会经济因素	夜间灯光	500	2019	GEE		
Socio-economic factors	GDP	1000	2019	https://www.resdc.cn		
	人口密度	1000	2019	https://www.resdc.cn		
地形因素	DEM	30	_	http://www.gscloud.cn		
Terrain factors	坡度	30	_	http://www.gscloud.cn		

# 2 研究方法

# 2.1 划分地表温度等级

本研究采用均值标准差法将地表温度划分为 5 个等级包括极高温(Extremely high temperature, EHT)、高温(High temperature, HT)、中温(Medium temperature, MT)、低温(Low temperature, LT)、极低温(Extremely low temperature, ELT),该方法利用均值与不同标准差倍数进行组合能良好的表征 LST 的集中性与波动性<sup>[32]</sup>。具体划分细则如表 2 所示。

表 2 地表温度等级的划分标准

Table 2 The classification standard of land surface temperature levels

温度等级	划分依据	温度等级	划分依据
Temperature grades	Basis	Temperature grades	Basis
极高温 Extremely high temperature	<i>T&gt;</i> µ+1.5std	低温 Low temperature	$\mu$ -1.5 $std \leq T < \mu$ -0.5 $std$
高温 High temperature	$\mu$ +0.5 $std$ < $T \le \mu$ +1.5 $std$	极低温 Extremely low temperature	<i>T</i> < <i>µ</i> −1.5std
中温 Medium temperature	$\mu$ -0.5std $\leq T < \mu$ +0.5std		

T 为温度区间, $\mu$  为平均值,std 为标准差

#### 2.2 趋势分析法

# 2.2.1 Sen's 斜率分析和 Mann-Kendal(M-K) 趋势检验

Sen's 斜率分析是一种估算时间序列变化趋势的方法。它基本原理是通过计算时间序列中所有相邻两数据之间的斜率,然后取斜率的中值作为变化趋势,能够有效的降低缺失值和异常值的影响<sup>[33]</sup>。计算公式如下:

Slope = medium 
$$\left(\frac{\text{LST}_j - \text{LST}_i}{j - i}\right)$$
,  $\forall j > i$  (1)

式中 medium 为取中值函数; LST<sub>i</sub>和 LST<sub>i</sub>为在时间序列中第j和i时刻的观测值; 当 Slope<0 时表示下降趋势, Slope>0 时表示上升趋势。

M-K 趋势检验是一种非参数检验方法,常常与 Sen's 斜率分析结合使用,用于判定变化趋势的显著性<sup>[34]</sup>。 其是通过计算其标准正太统计分布量 Z 来判别显著性的,具体计算方法如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$
 (2)

式中 Var(S) 为 S 的方差, S 的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \text{sgn}(LST_j - LST_i)$$
 (3)

式中 sgn(LST, - LST,) 为符合函数,其表达式如下:

$$\operatorname{sgn}(\operatorname{LST}_{j} - \operatorname{LST}_{i}) = \begin{cases} 1 & \operatorname{LST}_{j} - \operatorname{LST}_{i} > 0 \\ 0 & \operatorname{LST}_{j} - \operatorname{LST}_{i} = 0 \\ -1 & \operatorname{LST}_{j} - \operatorname{LST}_{i} < 0 \end{cases}$$

$$\tag{4}$$

本研究取 95%和 99%的置信度水平,即当  $Z \ge 2.58$  或  $Z \le 2.58$  时,变化趋势为极显著;  $1.96 \le Z < 2.58$  或  $-2.58 < Z \le -1.96$  时,变化趋势为显著; 否则变化趋势为不显著。

# 2.2.2 Hurst 指数

基于重标极差(R/S)的 Hurst 指数,能通过反映前后时间序列的相互关系,来判别时间序列未来的变化情况<sup>[35]</sup>。因此结合 Sen's 斜率和 M-K 趋势检验,可用于分析 LST 未来的变化趋势。当 Hurst>0.5 时,表明 LST 变化趋势具有可持续性,即未来的变化趋势极有可能与现在相同;Hurst≤0.5 时,表明未来 LST 变化趋势不确定,本研究将其归为变化趋势未知。

为了更好的分析 LST 的变化趋势和未来变化趋势,本研究将 Sen's 斜率分析、Mann-Kendal 趋势检验和 Hurst 指数的结果进行叠加分析,划分了变化趋势的等级。表 3 给出了具体的划分条件。

斜率和 Z 值 Slope and Z value	变化趋势 Trends	斜率、Z 值与 Hurst 指数 Slope, Z value and Hurst index	未来的变化趋势 Future trends			
Slope<0, $Z \leq -2.58$	极显著降低	Slope<0, $Z \leq -2.58$ , Hurst>0.5	持续极显著降低			
Slope<0, $-2.58 < Z \le -1.96$	显著降低	Slope<0, $-2.58 < Z \le -1.96$ , Hurst>0.5	持续显著降低			
Slope<0, $-1.96 < Z < 1.96$	不显著降低	Slope<0, $-1.96 < Z < 1.96$ , Hurst>0.5	持续不显著降低			
Slope>0, $1.96 < Z < 1.96$	不显著升高	Slope>0, $1.96 < Z < 1.96$ , Hurst>0.5	持续不显著升高			
Slope>0, $1.96 \le Z < 2.58$	显著升高	Slope>0, $1.96 \le Z < 2.58$ , Hurst>0.5	持续显著升高			
Slope>0, $Z \ge 2.58$	极显著升高	Slope>0, $Z \ge 2.58$ , Hurst>0.5	持续极显著升高			
_	_	Hurst≤0.5	变化趋势未知			

表 3 变化趋势的判断条件和等级定义

#### Table 3 Judgment conditions and grade definitions for changing trends

# 2.3 地表干度指数 NDBSI 的计算

NDBSI 是 Hu<sup>[36]</sup>等所提出的一种衡量地表"干化"程度的新型指标,它是基于建筑指数(BI, Built-up Index)和裸土壤指数(SI, Soil Index)求平均值组合而成的,该指数可以增强包括裸土和建筑在内的裸露地表信息。计算方式如下:

$$NDBSI = (IBI + SI)/2$$
 (5)

$$IBI = \frac{2\beta_{\text{SWIR}}}{\beta_{\text{SWIR}} + \beta_{\text{NIR}}} - \left(\frac{\beta_{\text{NIR}}}{\beta_{\text{Red}} + \beta_{\text{NIR}}} + \frac{\beta_{\text{Green}}}{\beta_{\text{Green}} + \beta_{\text{SWIR}}}\right) - \frac{2\beta_{\text{SWIR}}}{\beta_{\text{SWIR}} + \beta_{\text{NIR}}} + \left(\frac{\beta_{\text{NIR}}}{\beta_{\text{Red}} + \beta_{\text{NIR}}} + \frac{\beta_{\text{Green}}}{\beta_{\text{Green}} + \beta_{\text{SWIR}}}\right)$$
(6)

$$SI = \frac{(\beta_{\text{SWIR}} + \beta_{\text{Red}}) - (\beta_{\text{NIR}} + \beta_{\text{Blue}})}{(\beta_{\text{SWIR}} + \beta_{\text{Red}}) + (\beta_{\text{NIR}} + \beta_{\text{Blue}})}$$
(7)

式中, $\beta_{\text{Red}}$ , $\beta_{\text{Green}}$ , $\beta_{\text{Blue}}$ , $\beta_{\text{NIR}}$  和  $\beta_{\text{SWIR}}$  分别是 MYD09A1 数据的红、绿、蓝、近红外 1 和短波红外 1 波段的反射率。

#### 2.4 地理探测器模型(GDM)

GDM 是一种基于空间分异性特征,用于探索驱动力因素的空间统计学模型,通过测算地理要素之间的空间一致性程度来度量其之间的关联程度,有效的避免了地理要素之间的线性假设和共线性的情况,地理探测器包含因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测四个模块<sup>[37]</sup>。本研究将使用因子探测和交互探测两个模块,因子探测用于探究每个影响因素对 LST 解释力,交互探测用于探究影响因素之间共同作用时,对 LST 的影响以及影响因素之间的作用关系。

#### 2.4.1 因子探测

因子探测通过探测因变量(影响因素)在多大程度上解释了自变量(LST)的空间分异性来度量自变量对因变量的影响,该影响程度使用q值来量化。q值得表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \, \sigma_h^2}{N \, \sigma^2} \tag{8}$$

式中  $h=1, \dots, L$  为自变量或因变量的分类或分区;  $N_h$  和 N 分别为层 h 和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为因变量在层 h 和全区的方差。

# 2.4.2 交互探测

交互作用探测用于识别不同自变量之间的交互作用,即评估自变量 X1 和 X2 共同作用时对因变量的解释力是否会增加或减少,或对因变量的影响是否相互独立。评估方法是先计算两种自变量 X1、X2 对因变量的 q 值 :q(X1) 和 q(X2),以及两自变量交互时的 q 值  $:q(X1\cap X2)$ ,然后对 q(X1)、q(X2) 和  $q(X1\cap X2)$  进行比较,进而划分不同交互作用类型。具体交互作用类型以及划分准则见表 4。

表 4 交互作用类型及判断标准

Table 4 Types of interactions and judgment criteria

Min(q(X1),q(X2))为 q(X1),q(X2)两者取最小; Max(q(X1),q(X2)) 为 q(X1),q(X2)两者取最大; q(X1)+q(X2)为 q(X1),q(X2)两者 求和

# 3 结果分析

# 3.1 昼夜 LST 的空间分布特征

为了避免偶然性,本研究以 2005—2019 白天和夜间的平均值来分析昼夜空间格局差异。从结果可知,天山北坡城市群白天和夜间的 LST 空间分布格局存在明显差异(图 2)。在白天 LST 范围在-12.62℃到 42.62℃之间;EHT 和 HT 温度等级的面积占比分别为 2.23%和 33.19%;EHT 和 HT 都主要分布在吐鲁番市内,EHT 集聚在库木塔格沙漠区域。ELT 和 LT 的面积占比分别为 8.69%和 18.21%,ELT 主要分布在研究区西南边缘和中部的天山山脉高海拔地区,LT 主要嵌套分布在 ELT 外围以及天山山脉以北的绿洲区域,且绿洲区域的 LT 外围又被 MT 所包围,因此绿洲区域在变天表现为明显的冷岛特征。在夜间 LST 范围在-25.60℃到 10.57℃之间;EHT 和 HT 的面积比例分别为 5.97%和 20.43%,虽与白天一样同样聚集在吐鲁番市内;但与白天相比,

EHT 的面积明显增大且空间分布西移,集聚在吐鲁番市的绿洲区域;而 HT 的面积相较于白天面积明显缩小。 夜间 ELT 的面积占比和空间分布与白天几乎无异;LT 的面积占比与白天相比缩减较为明显,主要是天山山脉以北的绿洲区域,白天的大量 ELT 在夜间转变为了 MT 或 HT,因此绿洲区域在夜间表现出明显的热岛特征。总的来说,天山北坡城市群白天和夜间的 LST 格局以 MT 和 HT 为主,但绿洲区域 LST 格局异常明显。

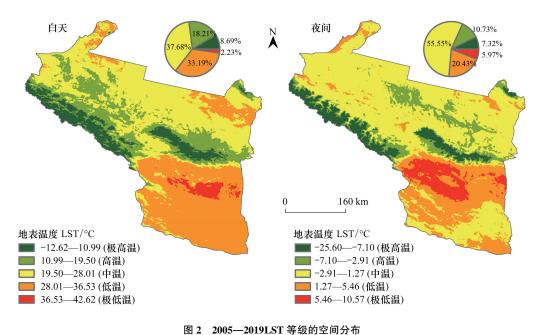


图 2 2005—2019LS1 等级的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of LST grades from 2005 to 2019

# 3.2 年平均 LST 的变化趋势

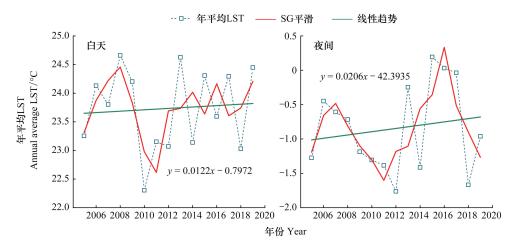


图 3 2005—2019 年平均 LST 的变化趋势

Fig.3 Variation trend of annual average LST from 2005 to 2019

#### 3.3 LST 的趋势变化特征

从 Sen's 斜率分析的结果来看(图 4),2005—2019 年间,不管白天还是夜间,天山北坡城市群 LST 表现为升高趋势的面积占比均远高于降低趋势的面积占比,因此总体均表现为升高的趋势。在白天,变化趋势在-0.69—1.02 %/a 之间,平均值为 0.04 %/a,呈升高趋势的面积占比为 69.87%,表现为降低趋势的面积占比为 30.13%。在夜间,变化趋势在-0.25 %/a—0.54 %/a 之间,平均值为 0.03 %/a,表现为升高趋势的面积占比为 89.97%,而呈现降低趋势的面积仅占 10.03%。

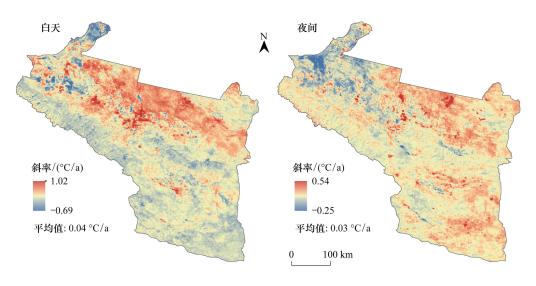


图 4 2005-2019 年 Slope 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of Slope from 2005 to 2019

将 Sen's 斜率分析与 M-K 趋势检验的结果进行叠加,并依据表 3 得到 LST 变化趋势等级,从结果来看 (图 5),不管白天还是夜间,绝大部分地区的变化趋势均表现为不显著(不显著升高和不显著降低),只有少部分地区的变化趋势表现为极显著或显著(极显著升高、显著升高、极显著降低、显著降低)。在白天,有 85.75%的地区变化趋势不显著;有 14.25%的区域的变化趋势表现为极显著或显著,其中分别有 3.91%和 9.00%的地区呈现极显著升高和显著升高的趋势,主要集聚在研究区中部的乌鲁木齐市、五家渠市、昌吉回族

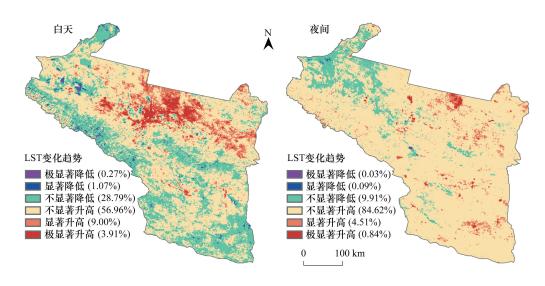


图 5 2005-2019 年 LST 的变化趋势

Fig.5 The changing trend of LST from 2005 to 2019

自治州和石河子市;有 1.07%和 0.27%呈显著降低和极显著降低的趋势,分布在研究区西边的沙湾市、奎屯市和乌苏市。在夜间,更是有高达 94.53%的区域变化趋势表现为不显著,仅有 5.47%的区域表现为极显著或显著,其中有 0.84%和 4.51%的区域呈现极显著和显著升高,但分布零散无明显集中的区域;而呈现极显著或显著降低趋势的区域均不超过 0.1%,同样零星分布无明显聚集的区域。

# 3.4 LST 未来的变化趋势

从 Hurst 指数结果来看(图 6),在白天,天山北坡城市群有 50.31%的区域 LST 变化趋势在未来具有持续性(Hurst>0.5),有 49.69%的区域 LST 未来的变化趋势未知(Hurst≤0.5)。在夜间,大部分地区 LST 变化趋势在未来处于持续稳定的状态,占研究区总面积的 65.30%,只有 34.70%的区域未来 LST 未来的变化趋势未知。

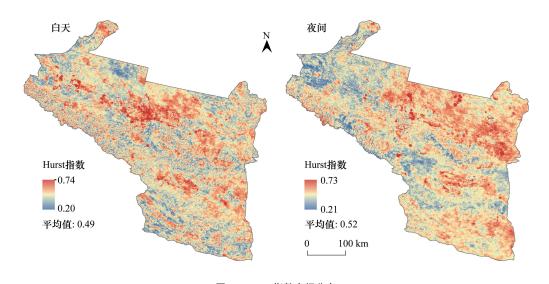


图 6 Hurst 指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of Hurst index

为了划分 LST 未来的变化趋势等级,本研究将 Sen's 斜率分析、M-K 趋势检验和 Hurst 指数进行叠加,以获得变化趋势、显著性和持续性的三重信息(表 3)。从结果可知(图 7),在白天,LST 未来的变化趋势表现为持续升高(持续不显著升高、持续显著升高和持续极显著升高)的面积比例为 32.72%,其中表现为持续显著

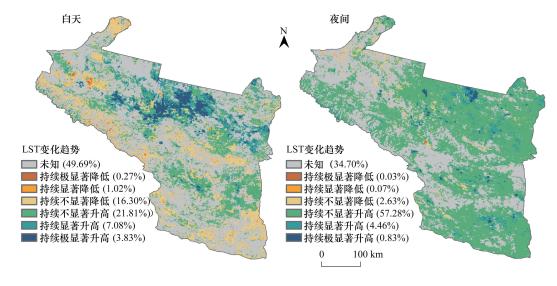


图 7 LST 未来的变化趋势

Fig.7 The future changing trend of LST

升高和持续极显著升高的面积比例分别为 7.08%和 3.83%, 主要聚集在乌鲁木齐、五家渠市、昌吉回族自治州 和石河子市,也就是说这些城市在未来 LST 将进一步升高。LST 未来的变化趋势表现为持续降低(持续不显 著降低、持续显著降低和持续极显著降低)的面积比例为17.59%,其中持续显著降低和持续极显著降低的面 积比例分别为 1.02%和 0.27%, 主要集中分布在沙湾市、奎屯市和乌苏市, 这些城市 LST 在未来会保持显著降 低的趋势。在夜间,LST 未来的变化趋势表现为持续升高的区域有 62.57%,而持续降低的区域仅有 2.73%, 且其中绝大部分区域均不显著(不显著升高和不显著降低)。也就是说,在夜间,未来虽有绝大部分区域的 LST 有升高的趋势,但升高的趋势并不显著。

#### 3.5 LST 的影响因素分析

使用地理探测器模型时,需要对连续型变量进行适当的离散化。目前常用数据离散化的方法有自然间断 点法、等间距法、分位数法、标准差法和几何间隔法等。但在选择方法和离散类别的数量时,多是依靠个人经 验,主观性较强;而通过 R 的 GD 包的可以依据 q 值来筛选最优离散方法和离散类别的数量。因此本研究,首 先根据研究区建立了 2 km 网格点来提取 LST 和每个影响因素的值,然后通过 R 的 GD 包对连续型变量进行 最优离散化,并计算地理探测器结果。考虑到各种数据的可获得性,本研究仅以 2019 年为例进行影响因素 分析。

# 3.5.1 因子探测分析

因子探测的 q 值范围在[0,1]之间,值越大表示影响因素对 LST 的解释(影响)力就越强,反之则越弱。 从结果可知(表5),各个影响因素对于 LST 的解释力在白天和夜晚存在显著差异,白天的解释力明显优于 夜晚。

从单个影响因素来看,不管白天还是夜间,降水对 LST 的影响都是最大,其次是 DEM,再其次是 AOD,这 三个影响因素在白天的 q 值都在 0.5 以上,夜间都在 0.4 以上,明显高于其他影响因素,说明降水、DEM 和 AOD 是影响天山北坡城市群 LST 的主要因素。从影响因素的类型来看,不管白天还是夜间,气候因素(降水 和 AOD)的平均 q 值最大,在白天约为 0.65,夜间约为 0.51;其次是地形因素(DEM 和坡度),白天约为 0.51, 夜间约为 0.40;再其次是地表覆盖因素(LULC, NDVI 和 NDBSI) 白天约为 0.40, 夜间约为 0.21;最后是社会经 济因素(夜间灯光、GDP 和人口密度),白天约为 0.17,夜间仅为 0.08。说明在天山北坡城市群,气候因素对 LST 的影响最大,其次是地形因素,当然土地利用和地表覆盖因素也重要影响因素之一,社会经济因素的影响 非常小。

时间 Time	LULC	NDVI	NDBSI	降水 Precipitation	AOD	夜间灯光 Nighttime light	GDP	人口密度 Population density	DEM	坡度 Gradient
2019 年白天 2019Daytime	0.32 **	0.43 **	0.43 **	0.75 **	0.54 **	0.09 **	0.20 **	0.23 **	0.59 **	0.43 **
2019 年夜间 2019Nighttime	0.11 **	0.25 **	0.27 **	0.61 **	0.41 **	0.06 **	0.10 **	0.09 **	0.57 **	0.22 **

表 5 2019 年白天/夜间各影响因素的 q 值 Table 5 The q value of each influencing factors during the daytime/nighttime in 2019

LULC: Land use and land cover; NDVI: Normalized difference vegetation index; NDBSI: Normalized differential build-up and bare soil index; AOD: Aerosol optical depth; GDP: Gross domestic product; DEM: Digital Elevation Model; \*\*表示 P<0.01

为了探究在不同城市 LST 的影响因素差异,本研究分别探测了 9 个城市每个影响因素在白天和夜间对 LST 的影响。结果表明(图 8),各影响因素对 LST 的影响因城市而异。对于大部分城市而言,气候因素(降 水、AOD)和地形因素(DEM、坡度)依旧是影响 LST 的主导因素,特别是降水和 DEM 它们对 LST 的影响最大; 而地表覆盖因素(LULC、NDVI 和 NDBSI)和社会经济因素(夜间灯光、GDP 和人口密度)对 LST 的影响依旧较 小。但在克拉玛依市, 地表覆盖因素对 LST 的影响较大, 这可能是由于克拉玛依市原本地貌相对单一, 多为 荒漠戈壁滩,但城市开发以来,地表覆盖类型趋于复杂化,导致原本也相对单一的 LST 值在不同的地表覆盖 类型上呈现出差异性。在石河子市、五家渠市和奎屯市,社会经济因素对 LST 的影响有了明显提升,如在奎屯市的夜间,夜间灯光对 LST 的影响最大(q=0.77),GDP 和人口密度的 q 值也都在 0.50 以上;这可能是因为这三个城市地势较为平坦,面积较小,而建成区面积比例较大,平均 GDP 和人口密度也较高,因此对 LST 的影响较大。石河子市、五家渠市和奎屯市,许多影响因素在白天对 LST 的影响不显著(P>0.05),说明在白天这些城市的 LST 影响机制可能更加复杂。

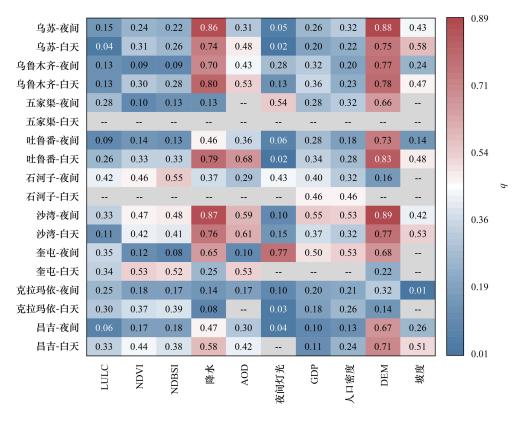


图 8 2019 年每个城市在白天/夜间各影响因素的 q 值(缺失值表示 P>0.05,结果不显著)

Fig.8 The q value of each influencing factors for each city during the daytime/nighttime in 2019 (missing value indicates P>0.05, the result is not significant)

# 3.5.2 交互探测分析

交互探测可以评估影响因素两两之间共同作用时对 LST 的解释力和作用关系。从结果可知(图 9),不管是白天还是夜间影响因素之间都只呈现出双因子增强和非线性增强两种关系,即不存在独立起作用的影响因素,且两种影响因素共同作用时大于单因素对 LST 的影响。

在白天,只有夜间灯光与 DEM 或坡度交互时表现为非线性增强,其他因素交互时均表现为双因子增强。降水与其他各因素交互时效果最为显著 (q>0.7),其与 NDVI 和 LULC 交互时 q 值最大 (q=0.83),说明在白天,当降水与 NDVI 或 LULC 交互时,对天山北坡城市群 LST 的影响最大。在夜间,大部分因素交互作用关系为双因子增强,非线性增强类型只会在社会经济因素 (夜间灯光、GDP 和 POP)之间交互或与其他因素交互时才会发生。降水与其他因素的交互效果在夜间依旧十分显著 (q>0.6),其与 DEM 交互时 q 值最大 (q=0.74),也就是说在天山北坡城市群,对夜间 LST 影响最大的是降水和 DEM 的交互作用。

#### 4 讨论

# 4.1 LST 的空间分布格局和变化趋势

不管白天还是夜间吐鲁番都是 HT 和 EHT 主要集中分布的地区,这与王丽平等[38]的研究结果相符,他们

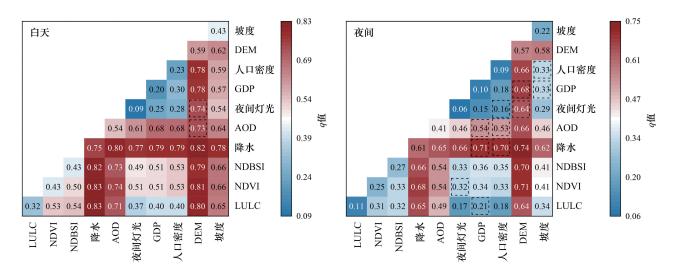


图 9 2019 年各影响因素的对 LST 的交互作用

Fig.9 The interaction of each influencing factors on LST in 2019 虚线框表示非线性增强,其余均为双因子增强

对中国地区 LST 的空间分布进行了研究,发现吐鲁番地区是我国的极热地区,年际最大值在75 ℃以上。这主要是由于吐鲁番大部分地区为沙漠,白天太阳直射升温快,加上其典型的盆地地形,空气流动性差,散热慢。本研究还发现,在研究区中部的绿洲区域,白天温度等级为 LT,而周围的温度等级为 MT,表现为明显的冷岛特征;而夜间温度等级为 HT,外围的温度等级为 MT,表现为明显的热岛特征。有前人基于 Landsat 数据分别对我国干旱和半干旱地区的额济纳绿洲[39]和张掖绿洲[40]进行了研究,他们也发现绿洲在白天呈现出较为明显的冷岛特征。而在一些发达的城市群,如京津冀城市群[29]和珠三角城市群[19]不管在白天还是夜间均表现为强烈的热岛特征。造成这种差异的原因主要是由于绿洲外围多为沙漠、裸地以及低覆盖草地,比热容小,白天太阳直射升温快,而绿洲内部人造蓝绿景观较多,含水量相对较高,比热容大,升温慢,因此,在白天绿洲城市内温度相对较低;而夜间则相反。

自 20 世纪 60 年代以来,全球气候变化最大的特点就是大规模变暖<sup>[41]</sup>,有研究发现全球变暖也存在间歇性<sup>[42]</sup>,这也可以在一定程度上解释年平均 LST 的波动性特征。本研究在对 LST 变化趋势的研究中发现,白天和夜间 LST 均表现为升高的趋势,白天平均每年约升高  $0.04\,^{\circ}\mathrm{C}$ ,夜间平均每年约升高  $0.03\,^{\circ}\mathrm{C}$ 。这与全国 LST 的变化趋势一致,Song 等<sup>[43]</sup>对 2003—2019 年全国 LST 的变化趋势进行了探究,他们也发现 LST 总体呈现升高的趋势,且白天比夜间更加强烈。"乌昌五"都市圈和石河子市作为天山北坡城市群发展战略思路与空间布局规划中的着重发展地区,在未来还将继续引领天山北坡城市群的发展<sup>[28]</sup>。但值得引起注意的是,在乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、五家渠市、石河子市,白天的 LST 有着显著的升高趋势,且未来仍具有相同的趋势。

#### **4.2** LST 的影响因素

基于地理探测器模型结果,本研究发现气候因素中降水对天山北坡城市群 LST 的影响最为强烈。水资源问题一直是制约新疆地区发展最核心的问题<sup>[44]</sup>,水的比热容大升温慢是天然的"散热器",降水可以直接带走地表的大量热量,并增加地表径流;降水还与植被覆盖度之间具有明显的相关关系<sup>[45—46]</sup>,因此降水还可以通过影响植被来间接影响 LST。地形因素中 DEM 对 LST 的影响也较为强烈,仅次于降水,这与 Wang 等<sup>[30]</sup>对四川盆地的研究结果一致,天山北坡城市群和四川盆地共同特点就是地势高低起伏大,天山北坡城市群的 DEM 极差在 5000 m 以上,在高海拔的天山山脉区域,终年积雪覆盖,LST 极低;而海拔最低的吐鲁番市却又是全国 LST 最高的地区。气候因素中 AOD 对 LST 的影响也较大,仅次于降水和 DEM。有研究发现 AOD 会影响地表对太阳短波辐射的吸收和与大气之间的辐射交换,从而对 LST 造成影响<sup>[47]</sup>。天山北坡城市群北部

的古尔班通古特沙漠是全球沙尘气溶胶主要排放源之一,加上人为气溶胶的排放,导致天山北坡城市群气溶胶颗粒污染严重<sup>[48—49]</sup>。这可能是 AOD 对天山北坡城市群 LST 影响较大的原因。社会经济因素(夜间灯光、GDP 和人口密度)对天山北坡城市群 LST 的影响非常小,这与前人对关中平原城市群<sup>[21]</sup>和珠三角城市群<sup>[19]</sup>的研究结果相悖,他们发现夜间灯光、GDP 和人口密度对 LST 有着非常显著的影响。造成这种差异的原因可能是因为天山北坡城市群作为一个西北边疆城市群,与以上两个城市群相比,其空间范围广,但城镇化程度低、经济水平落后、人口稀少,导致社会经济因素对 LST 的影响较小。

#### 4.3 局限性以及今后的工作

从 LST 的昼夜差异和在不同城市影响 LST 的主导因素不同,就能明显的看出 LST 在时间和空间上具有明显的尺度效应<sup>[50]</sup>,即在在不同时间和空间尺度下,研究结果可能存在明显差异。本研究从昼夜尺度上分析了 2005—2019 年间天山北坡城市群 LST 的空间分布格局以及变化趋势,并从不同空间尺度探究了 LST 的影响因素,为天山北坡城市群预防和缓解热环境问题提供了一定的理论依据,但本文还仍存在着一些局限性。首先是本研究仅从年际尺度分析 LST 的变化趋势,未来还需要考虑季节尺度上的变化,这将对农业生产更加具有指导意义<sup>[51]</sup>。其次是,虽然 MODIS 数据时间分辨率较高,但空间分辨率欠佳,在对城市内部的 LST 进行研究时,难以反映变化细节,因此结合高空间分辨率数据对 MODIS 数据进行降尺度融合,获得高时空分辨率的 LST 数据,将是未来城市地表热环境研究的重要方向。第三是,尽管本研究已经从气候、地表覆盖、社会经济以及地形方面考虑了 10 个影响因素对 LST 的影响,但从城市尺度的因子探测结果来看,未来还需要考虑更多的影响因素。最后是,地理探测器模型的交互探测模块只能分析两个影响因素交互时对 LST 的综合影响,对于多因素对 LST 的共同影响还需要进一步探究。

#### 5 结论

- (1)从空间分布来看,不管白天还是夜间,天山北坡城市群 LST 格局以 MT(中温)和 HT(高温)为主;吐鲁番市是温度最高的地区,也是 HT 和 EHT(极高温)的主要集聚区。从昼夜差异来看,天山北坡城市群白天和夜间 LST 空间分布格局差异较大,在绿洲区域白天为典型的冷岛特征,而夜间为热岛特征。
- (2)总的来看,2005—2019年间天山北坡城市群白天和夜间LST均表现为升高的趋势,且白天强于夜间;但绝大部分区域的变化趋势不显著;而在乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、石河子市和五家渠市升高的趋势非常显著,且在未来也具有相同的趋势,需要引起注意。
- (3)不同的空间尺度,影响 LST 的主导因素存在差异,作为典型干旱区绿洲城市群,不管白天还是夜间气候因素(降水和 AOD)和地形因素(DEM 和坡度)是影响 LST 的主导因素,其中气候因素对 LST 的影响最大,而社会经济因素的影响非常小;从单个城市尺度来看,在石河子、五家渠和奎屯地区社会经济因素是影响 LST 的主导因素。

# 参考文献 (References):

- [1] 段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国琲, 覃志豪. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. 遥感学报, 2021, 25(8): 1591-1617.
- [2] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C. Minimum configuration of thermal infrared bands for land surface temperature and emissivity estimation in the context of potential future missions. Remote Sensing of Envronment, 2014, 148: 158-167.
- [3] 李召良,段四波,唐伯惠,吴骅,任华忠,阎广建,唐荣林,冷佩. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 899-920.
- [4] Cao Q, Yu D Y, Georgescu M, Wu J G, Wang W. Impacts of future urban expansion on summer climate and heat-related human health in eastern China. Environment International, 2018, 112: 134-146.
- [5] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. Landscape and Urban Planning, 2017, 162: 126-136.
- [6] Gao Y J, Zhao J Y, Han L. Exploring the spatial heterogeneity of urban heat island effect and its relationship to block morphology with the geographically weighted regression model. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103431.

- [7] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 郑子豪, 李娟娟. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模. 资源科学, 2019, 41(6): 1154-1166.
- [8] Chen L, Wang X L, Cai X B, Yang C, Lu X R. Seasonal variations of daytime land surface temperature and their underlying drivers over Wuhan, China. Remote Sensing, 2021, 13(2): 323.
- [ 9 ] Xiong Y, Zhang F. Effect of human settlements on urban thermal environment and factor analysis based on multi-source data; a case study of Changsha city. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(6); 819-838.
- [10] 赵禾苗,阿里木江·卡斯木.基于地理探测器的喀什市地表热场空间分异及影响因素分析.生态与农村环境学报,2022,38(2):147-156.
- [11] 沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究. 地理科学, 2020, 40(5): 842-852.
- [12] 王戈,于强, Yang D, 赵晓婷, 赵桂芳, 岳德鹏. 京津冀城市群生态空间格局变化与地表温度关系研究. 农业机械学报, 2021, 52(1): 209-218.
- [13] 陆晓君, 刘珍环. 城市"源-汇"热景观变化及其空间作用强度特征——以深圳西部地区为例. 生态学报, 2021, 41(16): 6329-6338.
- [14] Wu Y F, Hou H, Wang R C, Murayama Y, Wang L Y, Hu T G. Effects of landscape patterns on the morphological evolution of surface urban heat island in Hangzhou during 2000-2020. Sustainable Cities and Society, 2022, 79: 103717.
- [15] Kuang W H, Yang T R, Liu A L, Zhang C, Lu D S, Chi W F. An EcoCity model for regulating urban land cover structure and thermal environment: Taking Beijing as an example. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6): 1098-1109.
- [16] Farhadi H, Faizi M, Sanaieian H. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran; investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. Sustainable Cities and Society, 2019, 46: 101448.
- [17] Wang X M, Meng Q Y, Zhang L L, Hu D. Evaluation of urban green space in terms of thermal environmental benefits using geographical detector analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 105: 102610.
- [18] Mushore T D, Mutanga O, Odindi J. Estimating urban LST using multiple remotely sensed spectral indices and elevation retrievals. Sustainable Cities and Society, 2022, 78: 103623.
- [19] Liu W X, Meng Q Y, Allam M, Zhang L L, Hu D, Menenti M. Driving factors of land surface temperature in urban agglomerations: a case study in the Pearl River Delta, China. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2858.
- [20] 梁洪武, 阿里木江・卡斯木, 赵禾苗, 赵永玉. 天山北坡城市群地表温度时空差异及贡献度分析. 干旱区研究, 2022, 39(2): 388-399.
- [21] 胡李发,谢元礼,崔思颖,周鹏,李云梅,孙韶启.关中平原城市群夏季城市热岛特征及驱动力.中国环境科学,2021,41(8):3842-3852.
- [22] 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.
- [23] 赵禾苗, 阿里木江・卡斯木. 乌鲁木齐市主城区热环境与下垫面关系研究. 测绘科学, 2021, 46(8): 179-187.
- [24] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [25] 张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [26] Gao Q, Fang C L, Liu H M, Zhang L F. Conjugate evaluation of sustainable carrying capacity of urban agglomeration and multi-scenario policy regulation. Science of the Total Environment, 2021, 785; 147373.
- [27] 孙帆, 王弋, 陈亚宁. 塔里木盆地荒漠-绿洲过渡带动态变化及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3397-3407.
- [28] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局. 干旱区地理, 2019, 42(1): 1-11.
- [29] Qiao Z, Tian G J, Xiao L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: a case study of Beijing using MODIS data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 85: 93-101.
- [30] Wang Z Y, Sun D Q, Hu C G, Wang Y, Zhang J X. Seasonal contrast and interactive effects of potential drivers on land surface temperature in the Sichuan Basin, China. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1292.
- [31] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [32] 哈尚辰, 阿里木江・卡斯木. 基于土地集约利用水平的城市热岛效应影响因子分析. 冰川冻土, 2016, 38(1); 270-278.
- [33] 罗赵慧,朱璐平,张晓君,房巧丽,杨晓,周丽旋,于锡军,梁明易,陆俊卿.粤港澳大湾区植被 CUE 变化及与气候变化的关系.中国环境科学,2021,41(12):5793-5805.
- [34] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制. 环境科学, 2022, 43(2): 743-751.
- [35] 王思, 张路路, 林伟彪, 黄秋森, 宋亦心, 叶脉. 基于 MODIS-归—化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究. 生态学报, 2022, 42(6): 2149-2163.
- [36] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality; a case from Fuzhou City, China.

- Ecological Indicators, 2018, 89: 11-21.
- [37] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望. 地理学报,2017,72(1):116-134.
- [38] 王丽平, 段四波, 张霄羽, 于艳茹. 2003—2018 年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1299-1308.
- [39] 杨丽萍,潘雪萍,刘晶,谢巍,马孟.基于 Landsat 影像的额济纳绿洲地表温度及冷岛效应时空格局研究.干旱区资源与环境,2019,33 (2):116-121.
- [40] 李润林, 时永杰, 姚艳敏, 田福平, 胡宇. 基于 LandsatTM/ETM+的张掖市甘州区绿洲冷岛效应时空变化研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 139-144.
- [41] Wen K M, Ren G Y, Li J, Zhang A Y, Ren Y Y, Sun X B, Zhou Y Q. Recent surface air temperature change over mainland China based on an urbanization-bias adjusted dataset. Journal of Climate, 2019, 32(10): 2691-2705.
- [42] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, Daniel J S, Davis S M, Sanford T J, Plattner G K. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. Science, 2010, 327(5970): 1219-1223.
- [43] Song Z J, Yang H, Huang X J, Yu W P, Huang J, Ma M G. The spatiotemporal pattern and influencing factors of land surface temperature change in China from 2003 to 2019. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 104: 102537.
- [44] 热孜娅・阿曼, 方创琳, 赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1576-1585.
- [45] 陈宽,杨晨晨,白力嘎,陈瑜,刘锐,潮洛濛.基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响.生态学报,2021,41 (12):4963-4975.
- [46] 涂又,姜亮亮,刘睿,肖作林,闵婕. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析. 农业工程学报, 2021, 37(22): 75-84.
- [47] Ma X F, Huang G, Cao J J. The significant roles of anthropogenic aerosols on surface temperature under carbon neutrality. Science Bulletin, 2022, 67(5): 470-473.
- [48] Choobari O A, Zawar-Reza P, Sturman A. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system; a review. Atmospheric Research, 2014, 138; 152-165.
- [49] Liu J, Ding J L, Rexiding M, Li X H, Zhang J Y, Ran S, Bao Q L, Ge X Y. Characteristics of dust aerosols and identification of dust sources in Xinjiang, China. Atmospheric Environment, 2021, 262: 118651.
- [50] Lan Y L, Zhan Q M. How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time. Building and Environment, 2017, 125; 88-98.
- [51] 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.