

2001—2020年中国地表温度时空分异及归因分析

田 浩^{1,2,3}, 刘 琳^{1,2}, 张正勇^{1,2}, 陈泓瑾^{1,2}, 张雪莹^{1,2}, 王统霞^{1,2}, 康紫薇^{1,2}

(1. 石河子大学, 石河子 832000; 2. 绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 石河子 832003;

3. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 地表温度(LST)变化对陆面过程的能量收支平衡与生态系统稳定有着至关重要的影响。本文基于MODIS数据,使用回归分析、GIS空间分析、相关性分析及质心模型等方法,分析了中国2001—2020年LST变化及其时空分异格局;运用地理探测器识别中国38个生态地理分区下LST变化的主导因子,进而探寻其形成原因。结果表明:①中国2001—2020年LST气候平均值为9.6℃,整体呈东南及西北干旱区高、东北及青藏高原低,平原高、山区低的基本格局;LST与海拔呈显著负相关,相关系数达-0.66;第一阶梯负相关性最为显著,相关系数达-0.76,LST递减率为0.57℃/100m;②中国2001—2020年LST倾向率为0.21℃/10a,升温区占国土面积的78%,整体呈现“多核式升温,轴线式降温”的空间特征;③中国LST及变化具有显著的季节性特征,冬、夏两季均温空间分布较其他季节的差异较大且波动更为明显;季节性升/降温区的质心轨迹呈环状,且运动呈现出对应的季节性反向轨迹,降温区质心移动幅度更大,说明降温区的区域差异性和季节变异性较大;④中国LST变化由自然影响与人类活动共同驱动,其中自然因素贡献更大,日照时数和海拔是关键因子;两大主导类型在空间分布上与“胡焕庸线”高度吻合,其以东区域多以人类活动强度为主导并与地形因子共同作用,而以西区域则多以自然因素为主,通过与气候、地形、植被等因子的相互耦合从而增强/削弱LST变化幅度。本文可为应对气候变化、解析地表环境模式、保护生态环境等方面提供科学参考。

关键词: 地表温度;时空分异;地理探测器;主导因子;中国

DOI: 10.11821/dlxb202207010

1 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)直接影响地球陆地表层系统能量平衡,是地球物理循环过程的关键参数,也是环境、生态、气候、水文、农业等研究领域的重要指标^[1-4]。现阶段LST的相关研究多集中于城市热岛效应^[5-8]、地方旱情监测^[9-10]、冻土冻融特征分析^[11]和区域生态环境质量评价等方面,而对全球、国家等大尺度上的时空格局分异和变化驱动机制等方面尚显不足,特别是对大尺度区域的地带相似性和区域差异性研究不够全面深入。中国气候复杂地形地貌多样,在不同特质的自然地理环境与不同强度的人类活动的综合影响下,LST表现出显著的区域特征和时空差异^[12-14],从而影响区域生态环境的形成演变以及生产方式的转化变革。因此,全面分析中国LST时空分布格局

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461086, 41761108) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41461086, No.41761108]

作者简介: 田浩(1996-), 男, 江苏盐城人, 博士生, 主要从事GIS分析及地学应用研究。

E-mail: haotian1996_china@163.com

通讯作者: 刘琳(1981-), 女, 湖南衡东人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事GIS应用与资源环境遥感研究。

E-mail: liulin779@163.com

可为区域资源保护与开发、农业生产布局、气象灾害防治等提供科学依据,探究中国生态地理分区LST空间异质性及演变特征将为气候变化监测与应对、地表环境模式解析等提供基础理论支撑。

气象站点实测是精确获取LST数据的可靠手段,但由于站点数量有限且分布不均,难以实现对复杂地形或人迹罕至区域LST的精细刻画。随着遥感技术的发展与应用,基于多种卫星数据(Landsat、MODIS、AVHRR、ASTER等)的遥感定量反演为大尺度、时空连续的LST快速获取提供了新途径,其中MODIS地表温度产品良好的时空分辨率可满足大、中尺度的研究要求^[15-18],已在青藏高原、黑河流域、东北冻土区、天山等区域的气温反演研究中取得较好的效果^[19-24],说明该数据产品在复杂地形下对地表能量的刻画仍具备科学性与可靠性。以往研究多将LST作为研究对象分析其自身变化特征或作为重要指标用以探寻其它地理现象或过程的内在机理,但由于数据来源/种类、时间序列、处理方法和过程等不尽相同,导致不同研究中各区域LST时空异质性的对比存在一定的不确定性或甚至难以类比的情况。因此,使用相同处理标准、相同尺度以及适宜精度的数据是进行全国尺度LST研究的前提与关键,运用统一的时空序列数据和变化驱动因子,可客观探究和比较全国尺度下LST的时空异质性及其格局成因。

中国由于气候类型多样、地形地貌复杂、生态环境百态、人类活动强度各异等地理特征导致各生态地理分区中影响LST变化的因子组合也存在差异,因子间的交互组合使LST演变呈多样化和复杂性^[25-27]。因此,在综合考虑地理空间与生态环境诸多因子的基础上,寻求合适的地统计分析方法来识别与诠释不同分区内主导LST变化的因子及类型就显得尤为重要。地理探测器能够充分表征地理事物的空间异质性,亦可客观反映出各地理综合体中各要素影响的优先级^[28],已在驱动力定量分析、生态地理空间划分、健康风险评估等领域均取得了丰硕成果^[29-35]。地理探测器所遵循的“自变量若对因变量存在重要影响,则两者在空间分布上具备一定相似性”核心假设^[28]为LST异质性主导因素的识别和成因分析提供了客观有力的理论基础。本文基于MODIS地表温度数据,定量刻画中国2001—2020年LST的时空分异规律,借助地理探测器识别不同生态地理分区下LST变化的主导因子及过程机制,可为应对气候变化、协调人地关系和区域可持续发展等提供科学参考。

2 数据及方法

2.1 数据来源及预处理

本文选取2001年1月—2021年2月覆盖中国的17幅MOD11C3数据产品,用以LST时空分异特征研究;并选取降水、日照时数、人口、NDVI、DEM、土地利用等数据用于LST异质性归因分析(表1)。

(1) MOD11C3单位换算

$$LST = 0.02DN - 273.15 \quad (1)$$

式中: LST 为地表温度值($^{\circ}\text{C}$); DN 为像元灰度值(K)。

(2) 月、季节、年平均LST数据合成

MOD11C3包含日间和夜间地温数据,使用算术平均法计算LST日均、月均、季均和年均数值。其中,以3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季。

表 1 数据说明
Tab. 1 Data introduction

数据	时段/分辨率	空间分辨率	数据来源	说 明
中国生态地理分区 ^[36]	—	—	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)	基于温度和干湿划分 48 个分区。为便于分析，本文在原分区基础上依据地貌特征和空间邻接关系，将其归并至 38 个分区(SHAPE 格式，图 1)。
LST (K)	2001-01—2021-02 逐月	5500 m	LAADS DAAC (https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/)	MOD11C3(HDF 格式)，经 MRT 软件镶嵌及重投影。
日照时数 (h)	2001—2020 逐日	1000 m	中国气象数据网 (http://data.cma.cn/)	中国 833 个气象站点逐日日照时数数据，剔除无效、异常值后，借助 ArcGIS 软件合成年数据并进行 spline 空间插值获得栅格数据(TIFF 格式)。
降水 (mm)	2001—2020 逐年	1000 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)	中国 1980 年以来逐年年平均气温空间插值数据集，基于全国 2400 多个气象站点日观测数据，通过整理、计算和使用 ANUSPLIN 插值软件处理生成(GRID 格式)。
人口密度 ^[37] (人/km ²)	2015	1000 m		中国人口空间分布公里网格数据集，基于行政单位人口统计值结合土地利用类型、夜间灯光亮度、居民点密度等数据的加权计算(GRID 格式)。该数据既可表征中国人口的空间分布特征，也能定量刻画人类活动强度。
土地利用 ^[38]	2020	1000 m		中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)，基于 2020 年 Landsat 8 影像解译生成(GRID 格式)，一级分类体系为：耕地、林地、草地、水域、城乡/工矿/居民用地、未利用地、海洋。
DEM (m)	—	250 m		中国海拔高度(DEM)空间分布数据，基于 SRTM V4.1 数据重采样生成(GRID 格式)。借助 ArcGIS 软件提取坡度、坡向和地形起伏度数据。
NDVI ^[39]	2001—2018 逐年	1000 m		中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集，基于 SPOT/VEGETATION 以及 MODIS 等数据经 MVC 法合成(TIFF 格式)。

注：除土地利用数据外,其余数据均重采样至 5.5 km×5.5 km 分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 LST 时空变化分析 LST 是研究地表能量平衡和资源环境变化的重要参数之一，可客观反映地理空间能量收支变化^[1-4]。本文借助一元线性回归、显著性检验、相关性分析和质心模型等分析 LST 变化特征。

(1) LST 倾向率

回归分析可确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系，使用一元线性回归方法计算倾向率以分析 LST 随时间的变化幅度。

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^n LST_i \times T_i - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n LST_i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)}{\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2} \tag{2}$$

式中：*slope* 为一元线性回归方程的斜率；*T_i* 为时间变量；*n* 为研究时段，本文取值为 20；*LST_i* 为第 *i* 年的中国地表温度值；*slope* < 0 和 *slope* > 0 分别表示 LST 在研究时段内随时间递减与递增，绝对值越大则表示 LST 上升/下降的速率越快。

(2) 显著性检验与分析

显著性检验用于描述抽样误差造成方程拟合差异的可能性大小, 可用于验证与描述式(2)中LST与时间的拟合效果, 使用 F 检验对式(2)所得斜率进行显著性检验, F 越大则说明拟合效果越佳, LST变化趋势越明确。

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (3)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

式中: U 为回归平方和; Q 为剩余平方和; y_i 是第 i 年地表温度值; \hat{y}_i 为其回归值; \bar{y} 为LST气候平均值。显著性水平取0.01与0.05, 通过查询 F 分布表可知, $F_{0.01} = 8.29$ 、 $F_{0.05} = 4.41$, 当 $F \geq F_{0.01}$ 则认为差异存在高度显著性, 当 $F_{0.05} < F < F_{0.01}$ 则认为差异存在显著性, 若 $F \leq F_{0.05}$ 则称差异无显著性。

(3) 相关性分析

使用相关性系数表征LST与海拔、NDVI等因子之间相关性的强弱关系。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: 相关性系数 r_{xy} 的范围是 $[-1, 1]$, $r_{xy} > 0$ 时, 代表两者关系呈正相关; $r_{xy} < 0$ 时, 代表两者关系呈负相关, r_{xy} 的绝对值越大代表其相关性就越强。

(4) 质心模型

使用升/降温区的质心位置及其偏移量以分析其季节性移动距离、速度和方向。

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (7)$$

式中: n 等于要素总数; x_i 和 y_i 是要素 i 的坐标; w_i 为要素 i 处的权重, 为对应像元的LST倾向率; \bar{X}_w 和 \bar{Y}_w 为质心的坐标。

2.2.2 地理探测器 地理探测器是检验单因子空间分异性和多因子耦合性的有效手段。本文使用地理探测器的因子探测模块定量检测因子是否影响了LST变化的空间异质性并测定该因子的影响程度。公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (8)$$

式中: $h = 1, 2, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层, 即分类或分区; N_h 和 N 分别为 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。

影响LST变化的因素多样且过程机制复杂, 但大致可归为自然、人为两方面^[40-42]。自然因素主要包括气候、地形、植被等, 其中日照时数与降水等气候因子可直接影响地表接收太阳辐射的总量; 海拔、坡度、坡向、地形起伏度等地形因子影响地表在不同高

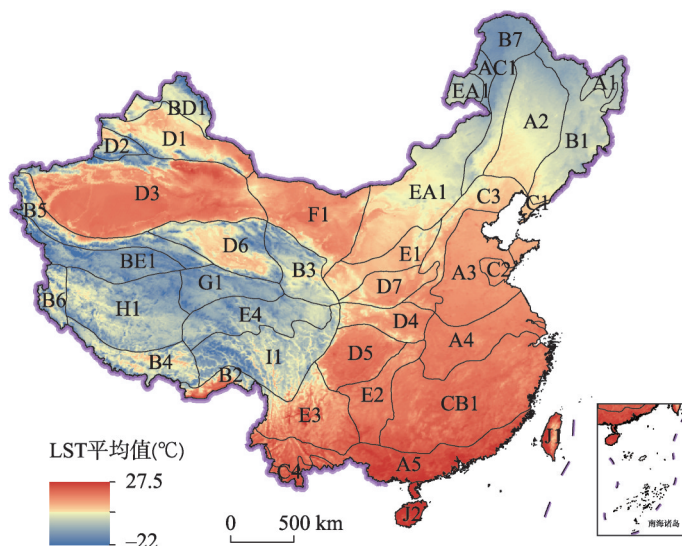
度、方向所能接收的太阳辐射量^[43]; NDVI是表征地表植被覆盖度的重要因子, 植被既可直接阻隔到达地表的太阳辐射, 又可通过其自身蒸散发作用对周边环境进行增湿降温^[44-46]。人为因素由人类活动强度和土地利用方式共同表征, 前者使用中国科学院的人口统计数据结合夜间灯光亮度、居民点密度等数据加权计算所得的人口密度数据表征^[37], 主要以人类的聚集程度来表征对自然环境的改造强度; 后者主要包括人类改变地表土地利用类型引起下垫面物理/化学性状的改变, 从而增强/削弱地表吸收/反射太阳辐射, 进而导致升/降温效应, 二者均可客观描述人为因素对地表热量分布的扰动程度^[47-48]。

通过地理探测器的因子探测对各地理分区上述因子的 q 值进行计算和排序, q 值越高, 则该因子对于LST变化的解释力更强^[28], 在剔除不具备统计学意义的因子后, 取因子中解释力最强的两个因子作为主导类型的划分标准, 第一因子为主导因子, 第二因子为辅助因子, 若以上两个因子处于同一主导类型中, 则选择排名第三的因子为辅助因子, 以此类推。最后根据贡献率识别各区的LST变化驱动因子并进行归因分析。

3 结果分析

3.1 中国LST时空格局及变化特征

3.1.1 中国LST时空格局 2001—2020年中国LST气候平均值为9.6℃, 空间差异性显著, 整体呈东南及西北干旱区高、东北及青藏高原低, 平原高、山区低的基本格局(图1、表2)。除D3外, 中国的LST高值区均处于东南部, 且均温普遍高于15℃; 其中, LST最高值区为J2, 气候平均值高达24℃。中部偏北主要为LST中值区(气候平均值5~15℃), LST低值区主要分布在西南部及东北、西北端, 仅BE1、G1和AC1的气候平均值低于0℃, 其中BE1温度最低, 为-3℃。LST受太阳辐射纬向递变控制而总体呈现由南向北逐渐降低的宏观基调, 由J2、A5、C4、J1等东南沿海的高值区, 自南向北递减至东北北部(如A1、B7等)和新疆北部(如BD1等)低值区。LST分布同时受垂向递变



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作, 底图边界无修改。

图1 2001—2020年中国平均LST空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of LST average value in China, 2001-2020

表 2 中国生态地理分区
Tab. 2 Eco-geographic zones of China

编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称
A1	三江平原	D5	四川盆地	B1	东北东部山地	AC1	三河山麓平原丘陵	A4	淮南与长江中下游平原
A2	东北平原	E2	贵州高原	B3	青东祁连山地	C1	辽东胶东山地丘陵	A5	闽粤桂山地丘陵平原
A3	华北平原	J1	台湾诸岛	C2	鲁中山地丘陵	B2	东喜马拉雅南翼	BD1	阿尔泰山与塔城盆地
B4	藏南山地	J2	琼雷诸岛	C3	华北山地丘陵	BE1	昆仑山高山高原	CB1	江南丘陵与岭南山地
B6	阿里山地	E3	云南高原	C4	滇南谷底丘陵	E1	晋中陕北甘高原	D3	塔里木与吐鲁番盆地
B7	大兴安岭	B5	昆仑山北翼	D7	晋南关中盆地	E4	果洛那曲丘状高原	I1	川西藏东高山深谷
D2	伊犁盆地	D1	准噶尔盆地	H1	羌塘高原湖盆	EA1	内蒙古高平原		
D4	汉中盆地	D6	柴达木盆地	G1	青南高原宽谷	F1	阿拉善及河西走廊		

规律制约，青藏高原大部及天山、大兴安岭等高大山体均呈显著低温，特别是青藏高原气候平均值显著低于同纬度的中、东部地区；D3、F1等分区因植被稀疏、地表裸露也属同纬度相对高值区。可见太阳辐射决定了LST的宏观格局，而海拔和下垫面性状将直接影响局部地表热力性质和热量分布，从而强化LST空间异质性。

为进一步探讨沿纬向的三级阶梯LST与DEM的空间关联性，沿邻近“秦岭—淮河”一线的34°N纬线分别对LST与DEM作剖面线（图2）。显而易见，LST与海拔呈显著负相关，相关系数达-0.66，即海拔由第三阶梯到第一阶梯逐步上升，LST则呈显著下降趋势。二者在第一阶梯的负相关性最为显著，其次为第二阶梯，第三阶梯呈现较弱负相关。以百米为海拔梯度，使用分区统计计算各阶梯LST递减率（表3），中国LST依海拔梯度带的平均递减率为0.41℃/100 m，其中第二阶梯地形以高原、大盆地为主，与第一、第三阶梯邻接区域分布着一系列高山，地形起伏度较大，LST随海拔递减的幅度最大，高至0.57℃/100 m；其次是第一阶梯，青藏高原平均海拔约4000 m以上，尽管外缘的川藏高山峡谷区和祁连山地等地表起伏剧烈、海拔落差大，但高原面内部藏北高原、藏南谷地和柴达木盆地等广大区域地形起伏度较低，故LST倾向率小于第二阶梯，为0.44℃/100 m；第三阶梯地形较为平坦开阔，LST变化受海拔影响有限，主要由人类活动、植被等下垫面因素共同影响，LST垂直递减率仅为0.15℃/100 m。中国LST总体空间格局依地形地貌表现出显著的区域差异性，在山盆结构区、高海拔区差异性尤为突

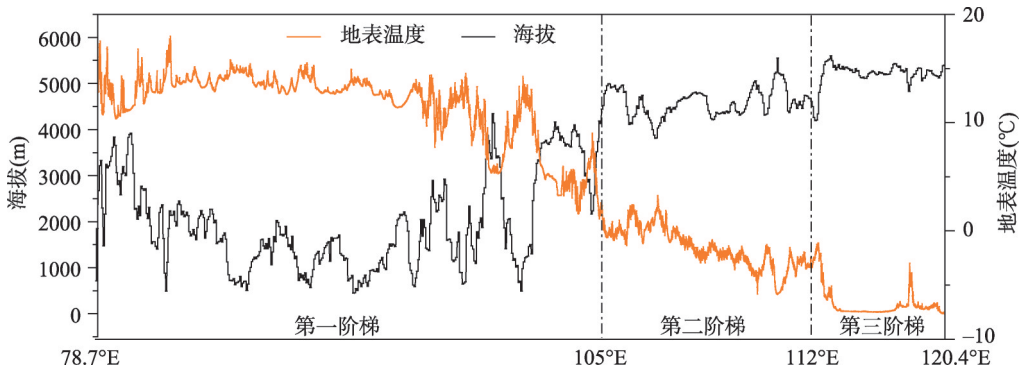


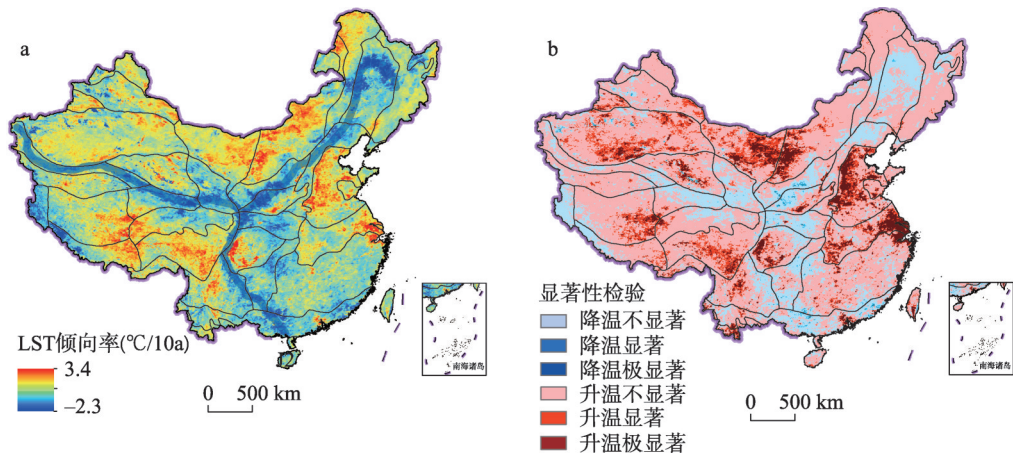
图 2 基于 34°N 的 LST 和 DEM 剖面线
Fig. 2 Section lines of LST and DEM at 34°N

出; 海拔因素削弱了中国LST依太阳辐射量纬向递减的趋势, 使其出现同纬低温或同纬高温的空间分异格局。

3.1.2 中国LST年际变化 中国20年LST倾向率为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 升温区占国土面积的78%, 整体呈现出“多核式升温, 轴线式降温”的空间特征(图3a)。升温区以长三角、华北平原、四川盆地、藏东南及内蒙古大部为核心, 其中AC1 ($0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) 升温最为显著(图3c)。降温区集中于“昆仑山—柴达木南缘”“环东北平原—大兴安岭—太行山—秦岭”及“环四川盆地—云贵高原东缘”3条轴线上, 整体呈“Y”型交汇于汉中盆地西部, 此外阿里—藏南山地降温亦较为显著; 降温区多为山脉高原沿线地带, 降温幅度最高地区为B6分区 ($-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。贵州高原的LST变化率仅为 $-0.002\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 为LST稳定区, 故下文不做讨论。

就升温区分布特征来看, A4、A3和A5区升/降温特征类似(图3a), 分别以长三角、京津冀和珠三角等城市集群为升温核心, 且显著性检验达到显著/极显著 ($F \geq F_{0.01}$) (图3b), 其中A4升温效应最强, 为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。中国北部与西南中部的高平原也存在两条升温带, 主要分布于内蒙古与东北地区的F1、EA1及青藏高原中、南部的I1、E4、B4、H1等地区。中国降温带主要出现在山区, 但新疆天山区出现了多个升温斑块(图3a), 且显著性极强 ($F \geq F_{0.01}$) (图3b), 特别是D2西部, 其原因可能是气候变暖背景下, 山区积雪存积时间变短, 山地冰川加速消融, 岩石裸露增加易吸收更多太阳辐射形成小范围升温^[24]。较为特殊的是, D5四川盆地作为典型升温核心镶嵌于中国“Y”形降温带的中南部, LST倾向率为 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 其升温核心区以“下玄月”状坐落于盆地西南部, 该分布特征与其山盆地形特征有较大关联。

中国沿山脉走向特征分布的“Y”型降温带将主要升温区分为3部分: 北部盆地—高平原带状升温区、西南高原—山谷嵌入式升温区和东部平原—盆地多核心聚集式升温

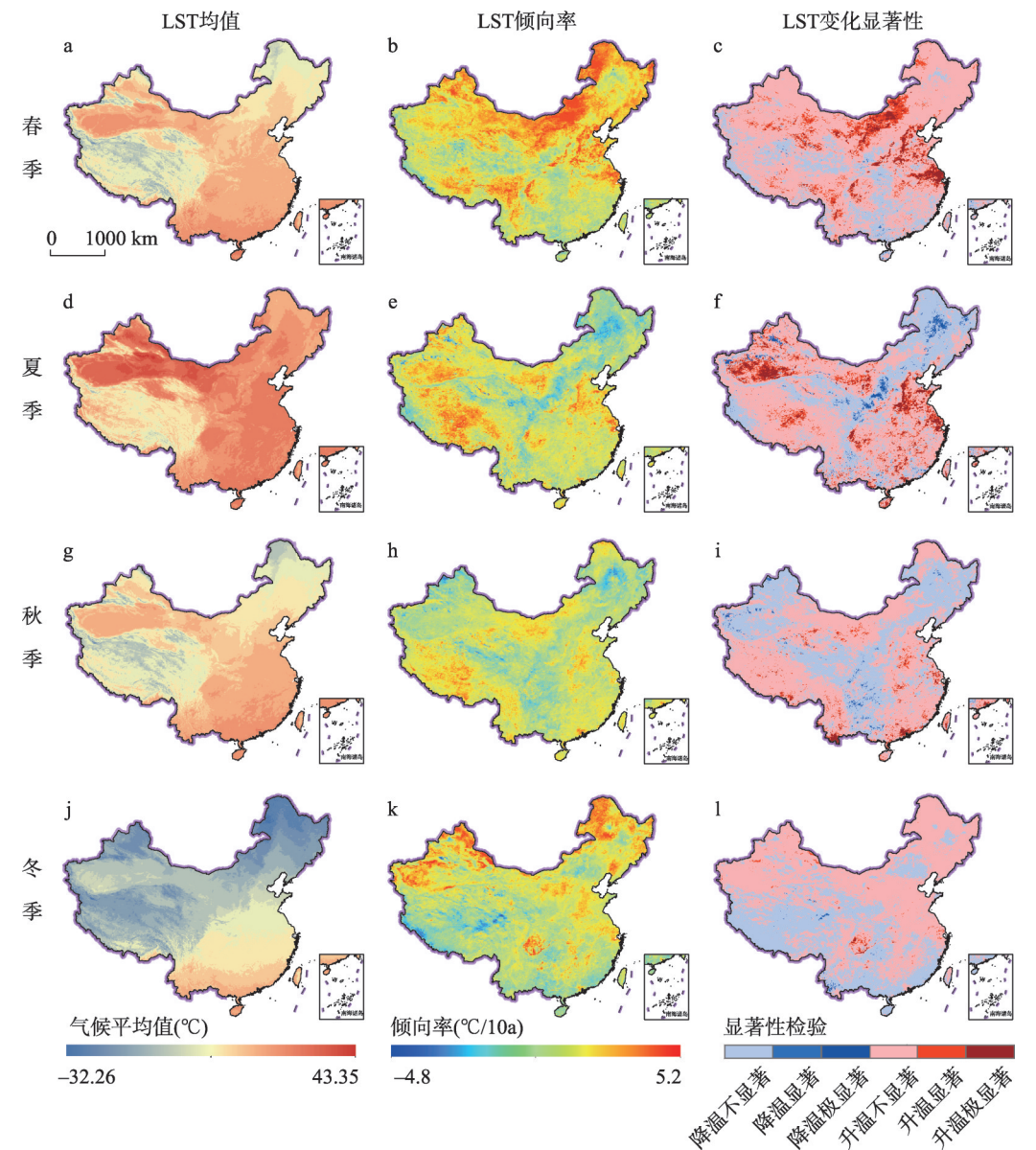


注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作, 底图边界无修改。

图3 2001—2020年中国LST空间变化及统计结果
Fig. 3 Spatial variation and statistical results of LST in China in 2001-2020

区。中国 LST 整体上呈现升温状态，升温强度高且面积广，有多核心扩散为带状区域升温的趋势，降温强度低且分布呈破碎和边缘化趋势。

3.1.3 中国 LST 季节分异 中国 LST 及变化具有显著的季节性差异（图 4）。春、秋两季 LST 气候平均值分别为 11.08 °C 和 10.05 °C（表 4），空间分布特征相近，低值均分布于青藏高原和东北地区；夏季 LST 气候平均值为 21.02 °C，除青藏高原外均为高温区，尤其是西北干旱区高温态势显著；冬季 LST 气候平均值为 -4.39 °C，大致以“秦岭—淮河”一带为界呈南高北低的特征，冬季 LST 标准差达 10.38（表 4），是四季中区域冷热差异性最强的季节。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作,底图边界无修改。

图4 2001—2020年中国LST季节时空分布及变化

Fig. 4 Spatial distribution and variation of LST in different seasons in China in 2001-2020

中国各季节 LST 仍以升温为主, 各季升温区面积占总国土面积之比均大于 60% (图 4)。升温效应最强的季节为春季 (4.5 °C/10 a), 其次是夏季, 秋季最弱, 仅为 0.08 °C/10 a (表 4)。春季升温区面积占比 80%, 北方的升温幅度及面积占比均高于南方, 主要包括大兴安岭—太行山—阴山—祁连山—天山以北, 同时华北平原、山东半岛、江淮平原以及西南山盆等亦呈较高的显著性等级 ($F_{0.05} < F <$

$F_{0.01}$)。夏季升温区面积显著减少至 65%, 东部升温区较春季变化不大, 祁连山—横断山以西的盆地与高原的升温强度有所增加且显著性等级较高, 四川盆地的升温强度较春季有所降低, 但显著性仍处于较高等级 (图 4); 东北平原降温明显可能与东北冷涡关系密切, 其形成的连续阴雨天气在夏季发生频率增加、活动天数增多且强度增大^[49], 对 LST 降温效应显著。秋季升温区进一步减少至 60.07%, 以四川盆地及新疆 (尤其是北疆) 地区降温最为明显。冬季升温区面积有小幅增加, 如新疆、东北地区及四川盆地, 而青藏高原降温显著, 尤其是藏南及果洛那曲地区。总体上看, 中国大部分地区 LST 变化随季节发生小幅度波动, 青藏高原、新疆及东北地区 LST 的季节性升/降温, 一定程度可反映其气候敏感性和指示性。

质心运动轨迹可直观反映中国 LST 升/降温区的季节性转移规律。2001—2020 年中国升/降温区质心运动均呈环状轨迹移动, 且方向呈现出对应的季节性反向 (图 5), 升温区质心在春—夏季沿西南方向移动, 降温区质心则向东北移动。升温区主要以季节性北移为主, 且以秋—冬季质心偏移量最大, 表明北方地区升温幅度大于南方, 因此暖冬在高纬度地区相对更为显著; 而降温区以季节性南移为主, 以春—夏季质心偏移量最大, 由此可知东北部夏季减温幅度大于南方。升/降温质心在夏—秋季偏移均呈最小值, 春、冬季质心位置也均较为接近。综合升/降温区的质心偏移量, 降温区质心移动幅度更大, 说明中国降温区的区域差异性和季节变异性较大, 与其空间分布的分散性和破碎性有关, 而升温区域差异性和季节变异性均较小, 进一步印证了中国 LST 增温的普遍趋势。

3.2 中国 LST 变化主导因子识别

基于地理探测器, 按照因子 q 值排序可确定 LST 变化主导因子、类型及其交互作用。探测发现中国 LST 变化主导因子可归为自然 (气候、地形、植被) 主导型和人为主导型 (图 6), 同时受因子组合、叠加等不同方式和强度影响下, 各地理分区 LST 的增强/减弱又呈现一定的差异性和规律性。

表 4 中国 LST 季节均温及变化率				
Tab. 4 Seasonal average value and change rate of LST in China				
季节	春季	夏季	秋季	冬季
LST 均温(°C)	11.080	21.020	10.050	-4.390
均温标准差	8.030	8.640	7.730	10.380
LST 变化倾向率(°C/10 a)	0.450	0.164	0.080	0.157
倾向率标准差	0.045	0.048	0.038	0.050
升温区气候平均值(°C/10 a)	0.610	0.440	0.330	0.450
降温区气候平均值(°C/10 a)	-0.230	-0.360	-0.280	-0.310
升温区面积占比(%)	80.210	65.770	60.070	61.220
降温区面积占比(%)	18.790	34.230	39.930	38.780

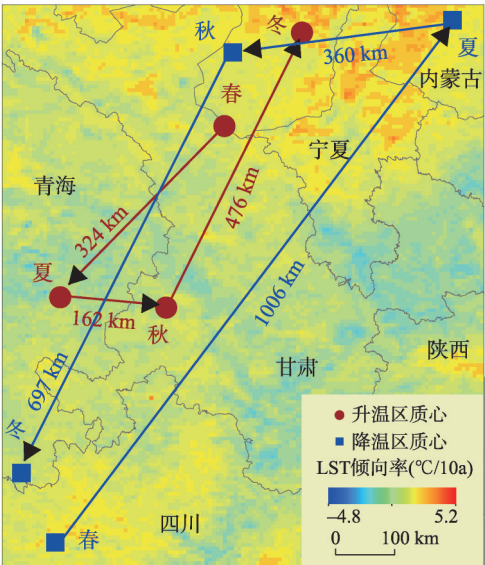


图5 2001—2020年四季升/降温区质心运动轨迹
Fig. 5 Trajectory of centroid in warming/cooling zones in different seasons in China in 2001-2020

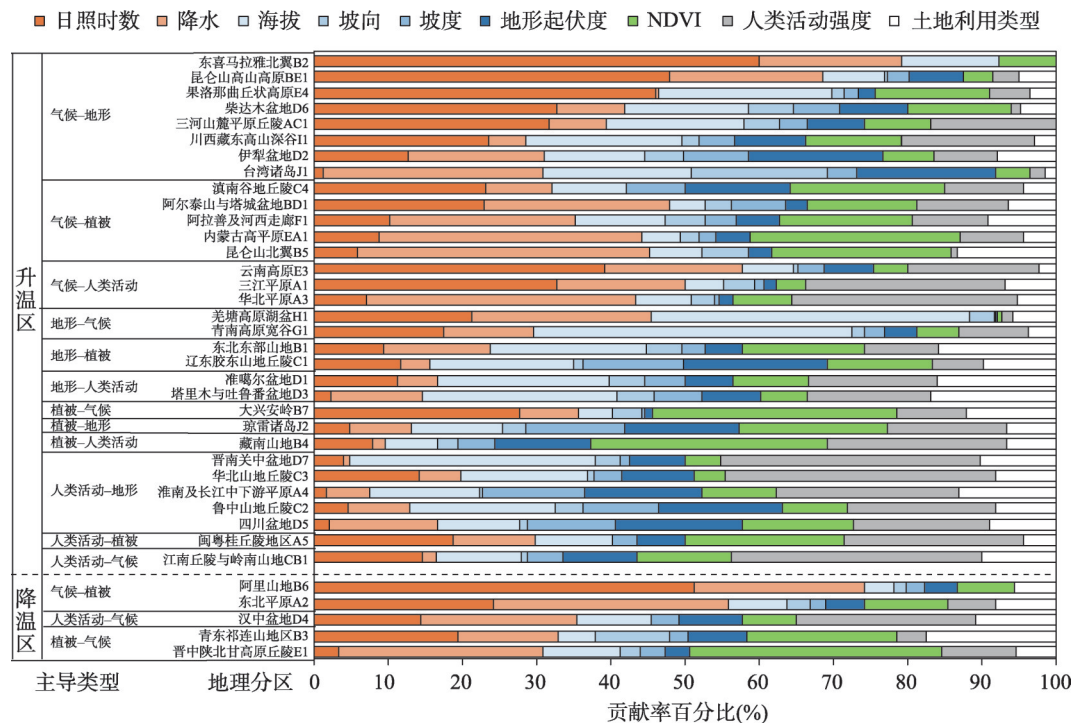


图6 LST变化率因子探测结果及主导类型划分

Fig. 6 The factor detection results of LST change rate and the division of dominant types

LST格局和演变是诸多因子共同作用的结果。中国升温区中气候主导型的分区数量多达16个，人类活动、植被覆盖和地形主导型的区域分别为7个、3个、6个（图6）。就各气候主导型的因子组合影响整体来看，日照时数对LST变化的贡献率略高于降水量，如B2分区日照时数对LST变化的贡献率占绝对优势（59.95%），但个别分区亦存在二者贡献率接近或降水影响略显著的现象，如BD1、D2分区日照时数贡献率分别为22.76%、12.74%，降水贡献率分别为25.18%、18.28%，二者对LST影响相当；B5分区降水因子贡献率达39.37%，高于日照时数影响。同时，气候因子多与地形因子结合共同影响区域升温，其中海拔因子的贡献较其他地形因子更突出，如E4和I1分区的海拔贡献率高达23.32%和21.06%；另外，气候要素中的降水因子与植被覆盖度关系密切，如F1、A1和B5分区的植被因子贡献率均高于18%，降水与植被二者组合亦对LST升高具有双重影响；在气候—人类活动组合类型中，除A3分区以降水的贡献率（36.42%）远高于日照时数（6.9%）外，其它区域均以日照时数控制气候因子与人类活动强度组合共同影响区域升温。海拔在地形主导型的升温区中是主要的控制因子，如H1、G1等分区；而C1分区的地形起伏度与海拔贡献率相当。植被主导型的升温区除B4分区（人类活动强度因子贡献率24.1%）外，其他地区多受地形因子中的海拔、气候因子中的日照时数组合显著影响。人类活动主导型区域往往同时受海拔因子的显著影响，如D7、C2、C3分区其海拔因子贡献率分别达33.0%、19.66%、17.22%；人类活动强度对LST变化的影响具有区域差异性，东部地区以人类活动为主导因子的升温区显著多于中部、西部地区且各主导因子的组合形式也存在差异。

中国降温区主要受气候和植被因子影响，其中日照时数和降水均有较大贡献率，而受地形因子影响较小，如B6和A2分区气候因子总贡献率分别高达74.01%和55.86%，而

E1分区的植被与降水因子的贡献率较为接近,分别为34.15%和27.51%。仅有D4为人为主导型,人类活动强度贡献率为24.24%,同时降水因子亦有较大贡献率(20.93%)。

总体来看,中国各升/降温区LST变化的因子主导类型和组合方式多样,但对地理分区LST的影响强度仍存在一定的规律性。气候—地形、气候—植被组合类型为主导的区域最多、面积最大。气候主导型区域日照时数贡献度最大,且多处于高原、山盆地区。地形主导型区域海拔的贡献度最高。在人为因素主导型区域中,由于人类活动及其导致的土地利用类型改变直接影响了人口聚集区地表物质和能量的转换,因此人类活动与地形组合而导致的升温类型更为常见。上述主导因子相互耦合、紧密互馈,在周期性、规律性、地带性和局地性等因素共同驱动下,形成了不同地理分区LST及其变化的时空分异格局。

3.3 中国LST变化空间异质性归因分析

地形地貌对中国气候、水文、植被和人口分布有着深刻的影响,生态地理分区下的LST升/降类型也大致依地貌分界线呈较显著的集聚/分异特征(图7)。因此本文以“三级阶梯”为基本框架开展LST与前述主导因子间的空间相关性分析,以探究中国LST的空间差异性及变化原因。第一阶梯地形以高原、山地为主,是全球气候变化敏感区和预警区^[49],此处LST变化原因多以气候—地形为主导;第二阶梯以“山—盆”综合体、高平原为主,是中国重要的气候、生态过渡带^[50],该区域多以气候—植被为主导;第三阶梯以平原、丘陵为主,是中国主要的人口密集区域,分布多个大型城市群,多以人类活动—地形/气候为主导。整体看来,自然与人为两大主导类型有着“泾渭分明”的空间分布特征(图7),二者分界线与人口空间格局分界线——“胡焕庸线”高度吻合,后者既是气候、植被、地形地貌等自然地理格局的重要分界线,同时也划分了人口、交通、能源、城镇化率、国民经济总量等社会经济因子的大格局^[51-53],为此下文就以该经典且重要的地理分界线为界具体分析其两侧LST变化的原因。

“胡焕庸线”以东的地理分区(以下简称“以东区域”)多以人类活动强度主导因子与地形因子共同作用于区内LST变化(图7)。由于自然条件和人文历史等原因造成了长久以来中国区域发展的非均衡格局,以东区域地势相对平坦开阔且气候适宜,人口密度远高于西部地区,对地表的改造更加悠久且彻底,在长期抵御、适应及运用自然之力的基础上形成了稳固宜居、规模不一的城市集群或城市经济圈,造就了独有的人类生态系统,其人类活动强度较周围地区呈现显著高值,改变了自然环境下热量的



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1819号标准地图制作,底图边界无修改。

图7 基于生态地理分区的LST变化驱动力类型分布

Fig. 7 Driving force types of LST variation based on eco-geographic zones in China

“源—汇”格局^[54]。下垫面是气候形成的重要因素,对地表热量、动量、水汽交换及地气交互过程均有重要影响^[4-6],如人工不透水表面因其高吸热率、低比热容及由于城市建筑的辐射截获效应而具备的高蓄热特征^[2-3],人类生产与生活不断释放的热量、由于温室气体排放而加强的大气保温与逆温效应^[1],显著受人为影响的植被分布及演替等^[7-8],均直接或间接并持续性地影响着城市及周边区域热量收支平衡和空间分布,易形成特殊的局地气候模式,如热岛效应,雨岛效应等。正如IPCC第六次评估报告指出:全球气候变暖背景下,气候变化的某些方面在城市及其周边可能会被放大^[55-56]。以东区域在人为因素主导下的LST升温是明确且显著的(图7),且一般以城市群、经济圈为核心向四周辐射且升温效应随距离增加迅速衰减,因而影响广度相对有限;而地形(主要为海拔)则通过其对人口分布及活动强度的基础性限制作用而间接影响LST。该区域内的降温区则多与全球变暖背景下季风区降水事件增多变强有关。

“胡焕庸线”以西的地理分区(以下简称“以西区域”)主要包括青藏高寒区和非季风区,气候受海洋影响较小且以陆上内循环为主,植被稀疏,人口数量较少,人类活动强度相对较弱,地表以自然下垫面为主,故LST变化多以自然因素为主导(图7)。其中气候要素是地表升温的重要原因,而地形、植被覆盖、人类活动等因子的组合效应增强/削弱了LST变化幅度。气候因子中日照时数直接表征了地表接收太阳辐射的时长,从而显著影响地表升温过程,其对LST的影响大于降水。以西区域的日照时数变率为11.67 h/a,除B6分区LST因日照时数显著减小而呈降温趋势外,其余大部均有所增加。高海拔区域由于地形复杂与生态脆弱等原因,更易引起下垫面能量转化与物质转运^[55-56],如大范围的冻土融化、季节性积雪减少以及冰川持续消融引发的吸热过程使得LST处于阶段性降温状态;但随着冰雪消融后地表的反照率降低、吸收太阳辐射能力提高,使其极易向持续性升温状态转变^[57]。植被是标志区域生态敏感性与脆弱性的重要指标,在LST变化过程中也有不可替代的影响。普遍而言,植被通过反射和吸收部分太阳辐射使到达地面的太阳辐射层层减少,故植被变化与LST变化呈显著负相关^[41],特别是西部干旱/半干旱区人类农林业增长、生态修复等活动对区域LST降低有一定贡献,如D1、D3两大盆地的内陆河流域沿线出现了人造降温斑块,但由于荒漠戈壁广阔,植被稀疏,人类作用范围有限,整体上仍旧表现LST升温状态,而升温类型为地形—人类活动主导型,这与周围山区、平原有较大差别。由此可见中国20年的LST变化虽仍以自然因素主导,但人为因素的驱动效应也不可忽视。

综上所述,现阶段中国全域地理空间中影响LST变化的主导因素以“胡焕庸线”为界呈现显著地域差异,与不同因子组合共同形成了中国LST变化格局。地形因素作为较为稳定的本底因素直接地通过海拔递减、阴阳坡、峰谷地形等相对固定的限制因素影响LST,同时高大山体的气候效应也使得LST变化更加复杂;而日照时数和植被等重要的自然因子主要通过对太阳辐射的增消作用影响LST,其作用范围广、持续性强且相对稳定,存在一定波动性但可通过能量盈亏弥补。人为因素在东部区域以城市为核心向四周辐射且衰减迅速,其作用范围较小,且存在以小时、周、月、季节、采暖期和非采暖期等时间尺度的周期性变化和随机性变化。中国2001—2020年LST变化表明,人为因素可增强/减缓某些自然过程的影响;如IPCC第六次报告指出:人类活动对气候系统多圈层影响显著,其影响程度极有可能决定未来区域气候变化的方向^[55-56]。整体而言,自然因素与人为因素相互影响,使得气候变化具有复杂性和不确定性,仍需要进一步的长期监测和深入探讨。

全球变暖是全球性的气候问题,但变暖幅度存在时空差异,温室气体亦存在不同尺度的迁移转化过程。本文的LST变化归因分析虽以全球变暖为基本气候背景展开,但并未对其做定量和分区域的考量,因此对于人口稀疏地区的人类活动对LST的影响可能存在于一定程度的低估。

4 结论

本文基于MODIS地表温度数据,分析了2001—2020年中国地表温度及其变化的时空分异格局,并采用地理探测器,结合中国生态地理分区和“胡焕庸线”,探测中国不同区域地表温度变化的主导因子及其成因。结论如下:

(1) 中国2001—2020年LST平均值为 9.6°C ,整体呈东南及西北干旱区高、东北及青藏高原低,平原高、山区低的基本格局。LST与海拔呈显著负相关,相关系数达 -0.66 ,二者在第一阶梯负相关性最为显著,LST递减率达 $0.57^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,而第三阶梯则呈现较弱正相关。太阳辐射决定了地表温度的宏观格局,而海拔和下垫面性状则强化和细化了LST空间异质性。

(2) 中国2001—2020年LST倾向率为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,升温区占国土面积的78%,整体呈现出“多核式升温,轴线式降温”的空间特征。升温区以长三角、华北平原、四川盆地、藏东南及内蒙古大部为核心向外辐射。降温区则集中于“昆仑山—柴达木南缘”“环东北平原—大兴安岭—太行山—秦岭”及“环四川盆地—云贵高原东缘”3条轴线呈“Y”型交汇于汉中盆地西部,分布呈破碎和边缘化趋势。

(3) 中国LST及变化具有显著的区域差异性和季节变异性。冬、夏两季均温空间分布差异较大且波动明显。升降/温区域的质心移动轨迹呈环状,且运动方向呈现出对应的季节性反向,降温区质心移动幅度更大,说明降温区的区域差异性和季节变异性较大,与其空间分布的分散性和破碎性有关。

(4) 中国LST变化的因子主导型和组合方式多样,气候—地形、气候—植被等自然因素组合是LST变化主导类型,其中日照时数和海拔是关键因子。自然与人为两大类型的主导区域在空间分布上与“胡焕庸线”吻合,其以东区域多以人类活动强度为主导并与地形因子共同作用,而以西区域则以自然因素为主导,与气候、地形及植被等因子相耦合从而增强/削弱LST变化幅度。

参考文献(References)

- [1] Qiao Zhi, Huang Ningyu, Xu Xinliang, et al. Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 475-489. [乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003—2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律. *地理学报*, 2019, 74(3): 475-489.]
- [2] Shen Zhongjian, Zeng Jian. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 566-583. [沈中健, 曾坚. 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系. *地理学报*, 2021, 76(3): 566-583.]
- [3] Qiao Zhi, Tian Guangjin. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 476-484. [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.]
- [4] Hu Hengzhi. Study on temporal and spatial variation of surface temperature in Yangtze River Delta based on MODIS [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013. [胡恒智. 基于MODIS的长三角地表温度时空变化研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.]
- [5] Ren T, Zhou W Q, Wang J. Beyond intensity of urban heat island effect: A continental scale analysis on land surface temperature in major Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148334. DOI: 10.1016/J.SCITOT

- ENV.2021.148334.
- [6] Yang Z W, Chen Y B, Guo G H, et al. Characteristics of land surface temperature clusters: Case study of the central urban area of Guangzhou. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73. DOI: 10.1016/J.SCS.2021.103140.
- [7] Li Yuanzheng, Yin Ke, Zhou Hongxuan, et al. Progress in urban heat island monitoring by remote sensing. *Progress in Geography*, 2016, 35(9): 1062-1074. [李元征, 尹科, 周宏轩, 等. 基于遥感监测的城市热岛研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(9): 1062-1074.]
- [8] Qiao Zhi, Tian Guangjin. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing. *National Remote Sensing Bulletin*, 2014, 18(3): 715-734. [乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划. *遥感学报*, 2014, 18(3): 715-734.]
- [9] Bao Yansong, Yan Jing, Min Jinzhong, et al. Agricultural drought monitoring in north Jiangsu by using temperature vegetation dryness index. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 163-172, 294. [鲍艳松, 严婧, 闵锦忠, 等. 基于温度植被干旱指数的江苏淮北地区农业旱情监测. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 163-172, 294.]
- [10] Wang Fengjie, Feng Wenlan, Zhaxiyanzong, et al. The comparison of FY-3A/VIRR and TERRA/MODIS data for drought monitoring. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1229-1239. [王凤杰, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于 FY-3A/VIRR 和 TERRA/MODIS 数据藏北干旱监测对比. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1229-1239.]
- [11] Yue Shuping, Yan Yechao, Zhang Shuwen, et al. Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in Northeast China based on the ERA5-LAND dataset. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2765-2779. [岳书平, 闫业超, 张树文, 等. 基于 ERA5-LAND 的中国东北地区近地表土壤冻融状态时空变化特征. *地理学报*, 2021, 76(11): 2765-2779.]
- [12] Jiang Jingchao, Liu Junzhi, Qin Chengzhi, et al. Near-surface air temperature lapse rates and seasonal and type differences in China. *Progress in Geography*, 2016, 35(12): 1538-1548. [江净超, 刘军志, 秦承志, 等. 中国近地表气温直减率及其季节和类型差异. *地理科学进展*, 2016, 35(12): 1538-1548.]
- [13] Zhao Bing, Mao Kebiao, Cai Yulin, et al. Study of the temporal and spatial evolution law of land surface temperature in China. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2020, 32(2): 233-240. [赵冰, 毛克彪, 蔡玉林, 等. 中国地表温度时空演变规律研究. *自然资源遥感*, 2020, 32(2): 233-240.]
- [14] Huang Jiao, Gao Yang, Zhao Zhiqiang, et al. Comprehensive physiographic regionalization of China using GIS and SOFM neural network. *Geographical Research*, 2011, 30(9): 1648-1659. [黄姣, 高阳, 赵志强, 等. 基于 GIS 与 SOFM 网络的中国综合自然区划. *地理研究*, 2011, 30(9): 1648-1659.]
- [15] Ma Jin, Zhou Ji, Liu Shaomin, et al. Review on validation of remotely sensed land surface temperature. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(6): 615-629. [马晋, 周纪, 刘绍民, 等. 卫星遥感地表温度的真实性检验研究进展. *地球科学进展*, 2017, 32(6): 615-629.]
- [16] Wang Mengmeng. Methodology development for retrieving land surface temperature and near surface air temperature based on thermal infrared remote sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. [王萌萌. 地表温度与近地表气温热红外遥感反演方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.]
- [17] Li Zhaoliang, Duan Sibao, Tang Bohui, et al. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data. *National Remote Sensing Bulletin*, 2016, 20(5): 899-920. [李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 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.]
- [18] Gao Maofang, Qin Zhihao. The validation of Chinese land surface temperature products retrieved from moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2006, 18(3): 15-18, 88. [高懋芳, 覃志豪. 中国 MODIS 地表温度产品验证. *自然资源遥感*, 2006, 18(3): 15-18, 88.]
- [19] Wang Binbin, Ma Yaoming, Ma Weiqiang. Estimation of land surface temperature retrieved from EOS/MODIS in Naqu area over Tibetan Plateau. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2012, 16(6): 1289-1309. [王宾宾, 马耀明, 马伟强. 青藏高原那曲地区 MODIS 地表温度估算. *遥感学报*, 2012, 16(6): 1289-1309.]
- [20] Yang Guijun, Sun Chenhong, Li Hua. Verification of high-resolution land surface temperature by blending ASTER and MODIS data in Heihe River Basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 193-200. [杨贵军, 孙晨红, 历华. 黑河流域 ASTER 与 MODIS 融合生成高分辨率地表温度的验证. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 193-200.]
- [21] Liu Shibo, Zang Shuying, Zhang Lijuan, et al. Estimation of land surface temperature from MODIS in Northeast China. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 2251-2260. [刘世博, 臧淑英, 张丽娟, 等. 东北冻土区 MODIS 地表温度估算. *地理研究*, 2017, 36(11): 2251-2260.]
- [22] Zhou Ji, Li Jing, Zhang Lixin. Validation of algorithms for retrieving land surface temperature based on MODIS data: A case study in the upper reaches of Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 239-246. [周纪, 李京, 张立新. 针对 MODIS 数据的地表温度反演算法检验: 以黑河流域上游为例. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 239-246.]

- [23] Yao Yonghui, Zhang Baiping, Han Fang. MODIS-based air temperature estimation in the Hengduan Mountains and its spatio-temporal analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 917-927. [姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于Modis地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析. *地理学报*, 2011, 66(7): 917-927.]
- [24] Guan Yanlong, Wang Ranghui, Li Cheng, et al. Spatial-temporal characteristics of land surface temperature in Tianshan Mountains area based on MODIS data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 681-688. [管延龙, 王让会, 李成, 等. 基于MODIS数据的天山区地表温度时空特征. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 681-688.]
- [25] Hu M M, Wang Y F, Xia B C, et al. Surface temperature variations and their relationships with land cover in the Pearl River Delta. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(30). DOI: 10.1007/s11356-020-09768-z.
- [26] Jiang Yinghui, Jiao Limin, Zhang Boen. Scale effect of the spatial correlation between urban land surface temperature and NDVI. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1362-1370. [江颖慧, 焦利民, 张博恩. 城市地表温度与NDVI空间相关性的尺度效应. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1362-1370.]
- [27] Sun Changfeng, Kong Fanhua, Yin Haiwei, et al. Analysis of factors affecting mountainous land surface temperature in the summer: A case study over Mount Tai. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3396-3404. [孙常峰, 孔繁花, 尹海伟, 等. 山区夏季地表温度的影响因素: 以泰山为例. *生态学报*, 2014, 34(12): 3396-3404.]
- [28] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [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.]
- [29] Dong Y, Yin D Q, Li X, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation NDVI in association with climatic, environmental and anthropogenic factors in the Loess Plateau, China during 2000-2015: Quantitative analysis based on geographical detector model. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4380. DOI: 10.3390/RS13214380.
- [30] Zhang Ruoyan, Liu Weidong, Song Zhouying. Spatio-temporal evolution and driving factors of national development zones of China based on geodetectors. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(10): 2672-2683. [张若琰, 刘卫东, 宋周莹. 基于地理探测器的中国国家级开发区时空演化过程及其驱动力研究. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2672-2683.]
- [31] Gao J B, Jiang Y, Anker Y. Contribution analysis on spatial tradeoff/synergy of karst soil conservation and water retention for various geomorphological types: Geographical detector application. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107470. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107470.
- [32] Hua D, Hao X M. Spatiotemporal change and drivers analysis of desertification in the arid region of northwest China based on geographic detector. *Environmental Challenges*, 2021, 125. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107470.
- [33] Kou Zhixiang, Yao Yonghui, Hu Yufan. Delimitation of the northern boundary of the subtropical zone in China by Geodetector. *Geographical Research*, 2020, 39(12): 2821-2832. [寇志翔, 姚永慧, 胡宇凡. 基于地理探测器的中国亚热带北界探讨. *地理研究*, 2020, 39(12): 2821-2832.]
- [34] Pan Menghua, Huang Bin, Li Yanning. Analysis of spatial clustering and influencing factors of hand-foot-mouth disease in Nanning based on kernel density and geodetector. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2020, 24(11): 1269-1274, 1331. [潘梦华, 黄斌, 黎燕宁. 基于核密度和地理探测器的南宁市手足口病空间聚集及影响因素. *中华疾病控制杂志*, 2020, 24(11): 1269-1274, 1331.]
- [35] Dong Yuxiang, Xu Qian, Yang Ren, et al. Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 135-147. [董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨. *地理学报*, 2017, 72(1): 135-147.]
- [36] Zheng Du. System Research of Ecological Geographic Area in China. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [37] Xu Xinliang. Kilometer grid data set of China's population spatial distribution. Resource and Environment Science and Data Center (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121101. [徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121101.]
- [38] Xu Xinliang, Liu Jiuyan, Zhang Shuwen, et al. Multi period land use and land cover remote sensing monitoring data set in China (CNLUCC). Resource and Environment Science and Data Center (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201. [徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201.]
- [39] Xu Xinliang. Spatial distribution data set of annual vegetation index (NDVI) in China. Resource and Environment Science and Data Center (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018060601. [徐新良. 中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018060601.]
- [40] Zhu Xinming, Song Xiaoning, Leng Pei, et al. Spatial downscaling of land surface temperature with the multi-scale geographically weighted regression. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(8): 1749-1766. [祝新明, 宋小宁, 冷

- 佩, 等. 多尺度地理加权回归的地表温度降尺度研究. 遥感学报, 2021, 25(8): 1749-1766.]
- [41] Liu Jiang. Consistency evaluation of surface temperature between airs and MODIS and its spatio-temporal variation mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021. [刘桨. AIRS 和 MODIS 地表温度一致性评估及其时空变化机制研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.]
- [42] Yan Yibo. Spatio-temporal variations and driving factors of land surface temperature in China based on reconstructed remote sensing data [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. [严毅博. 基于重构遥感数据的中国地表温度时空变化与驱动因素研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.]
- [43] Yao Yonghui, Suonandongzhu, Zhang Yichi. Mountain elevation effect of the Alps and its implication for forest line. Progress in Geography, 2021, 40(8): 1397-1405. [姚永慧, 索南东主, 张一驰. 阿尔卑斯山山体效应及其对林线的影响分析. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1397-1405.]
- [44] Li Bin, Wang Huimin, Qin Mingzhou, et al. Comparative study on the correlations between NDVI, NDMI and LST. Progress in Geography, 2017, 36(5): 585-596. [李斌, 王慧敏, 秦明周, 等. NDVI、NDMI 与地表温度关系的对比研究. 地理科学进展, 2017, 36(5): 585-596.]
- [45] Zhou Ting, Zhang Yinsheng, Gao Haifeng, et al. Relationship between vegetation index and ground surface temperature on the Tibetan Plateau alpine grassland. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 58-69. [周婷, 张寅生, 高海峰, 等. 青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系. 冰川冻土, 2015, 37(1): 58-69.]
- [46] Cheng Danni, Wang Yingqi, Cheng Yongxiang, et al. Vegetation-water vapor-land surface temperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 456-466. [程丹妮, 王颖琪, 程勇翔, 等. 新疆典型沙漠和绿洲植被—水汽—地表温度相关性分析. 干旱区地理, 2022, 45(2): 456-466.]
- [47] Gwenaël M, Renan L R, PierreGilles L, et al. Mapping bioclimatic indices by downscaling MODIS land surface temperature: Case study of the Saint-Emilion Area. Remote Sensing, 2020, 13(1). DOI: 10.3390/RS13010004.
- [48] Montaner F D, Morales S L, Rodriguez J S, et al. Spatio-temporal variation of the urban heat island in Santiago, Chile during Summers 2005-2017. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3345. DOI: 10.3390/rs12203345.
- [49] Liu Gang, Lian Yi, Yan Pengcheng, et al. The objective recognition and classification of northeast cold vortex and the northern hemisphere atmospheric circulation characters in May to August. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 1042-1050. [刘刚, 廉毅, 颜鹏程, 等. 5—8 月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析. 地理科学, 2015, 35(8): 1042-1050.]
- [50] Chen Feng, Li Hongbo, Zhang Anlu. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 432-445. [陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. 地理学报, 2019, 74(3): 432-445.]
- [51] Hu Huanyong. Population distribution in China: Statistical tables and density maps are attached. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2): 33-74. [胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图. 地理学报, 1935, 2(2): 33-74.]
- [52] Fang Chuanglin. Bole-Taipei Line: The important function and basic conception as a line for regional balanced development. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 211-225. [方创琳. 博台线: 中国区域发展均衡线的重要功能与建设构想. 地理学报, 2020, 75(2): 211-225.]
- [53] Qi Wei, Liu Shenghe, Zhao Meifeng. Study on the stability of Hu Line and different spatial patterns of population growth on its both sides. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 551-566. [戚伟, 刘盛和, 赵美凤. “胡焕庸线”的稳定性及其两侧人口集聚模式差异. 地理学报, 2015, 70(4): 551-566.]
- [54] Wu Jiansheng, He Haishan, Hu Tian. Analysis of factors influencing the "source-sink" landscape contribution of land surface temperature. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1): 51-65. [吴健生, 何海珊, 胡甜. 地表温度“源—汇”景观贡献度的影响因素分析. 地理学报, 2022, 77(1): 51-65.]
- [55] Hu Ting, Sun Ying. Interpretation of IPCC AR6 on human influence on the climate system. Climate Change Research, 2021, 17(6): 644-651. [胡婷, 孙颖. IPCC AR6 报告解读: 人类活动对气候系统的影响. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 644-651.]
- [56] Wang Wen, Fu Wenrui. The climatic impact-driver framework. Climate Change Research, 2021, 17(6): 719-725. [王文, 傅文睿. IPCC AR6 报告解读: “产生影响的气候因子”评估框架. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 719-725.]
- [57] Yao Junqiang, Mao Weiyl, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57-72. [姚俊强, 毛伟峰, 陈静, 等. 新疆气候“湿干转折”的信号和影响探讨. 地理学报, 2021, 76(1): 57-72.]

Spatiotemporal diversity and attribution analysis of land surface temperature in China from 2001 to 2020

TIAN Hao^{1,2,3}, LIU Lin^{1,2}, ZHANG Zhengyong^{1,2}, CHEN Hongjin^{1,2},
ZHANG Xueying^{1,2}, WANG Tongxia^{1,2}, KANG Ziwei^{1,2}

(1. Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology of Xinjiang Bingtuan, Shihezi 832003, Xinjiang, China;

3. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832003, Xinjiang, China.)

Abstract: The variation of land surface temperature (LST) has a vital impact on the energy balance of the land surface process and the ecosystem stability. Based on MDO11C3, we used methods including regression analysis, GIS spatial analysis, correlation analysis, and center-of-gravity model, etc., to analyze the LST variation and its spatiotemporal diversity in China from 2001 to 2020. Finally, the Geodetector was used to identify the leading factors of LST variation in 38 eco-geographical zones of China, and explore the causes of its pattern. The results show that: (1) the average LST in China from 2001 to 2020 is 9.6 °C, which is high in the plains, and low in the mountainous areas. Generally, LST has a striking negative correlation with altitude, with a correlation coefficient of -0.66. China's First Ladder has the most conspicuous negative correlation, with a correlation coefficient of -0.76 and the lapse rate of LST is 0.57 °C/100 m. (2) The change rate of LST in China during the study period is 0.21 °C/10 a, and the warming area accounts for 78%, showing the spatial characteristics of "multi-core warming and axial cooling" in general. (3) LST's variation has prominent seasonal characteristics in the whole country. The spatial distribution of average value in winter and summer is quite different and fluctuates obviously; the moving trajectory of the centroid in the warming/cooling area is close to a loop shape. The movement direction shows the corresponding seasonal reverse, and the movement range in the cooling zone is larger, indicating that the regional difference and seasonal variability of the cooling zone are more obvious. (4) China's LST variation is driven by natural conditions and human activities, of which natural factors contribute more, with sunshine hours and altitude being the key factors. The boundary trend between the two dominant type areas is highly consistent with the "Heihe-Tengchong Line". The eastern region is mostly dominated by human activity intensity and interacts with terrain factors, while the western region is dominated by natural factors, which enhance/weaken the change range of LST through mutual coupling with the climate, terrain, vegetation, and other factors. This study can provide scientific references for dealing with climate change, analyzing surface environmental models, and protecting the ecological environment.

Keywords: land surface temperature; spatiotemporal differentiation; geodetector; dominant factor; China