

天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性

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

(1. 石河子大学理学院, 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)

摘要: 人类活动强度与地表温度的时空关联研究对于充分认识气候变化的成因和机制、积极适应气候变化、合理开发及保护生态环境等均具有重大意义。本文以地处西北干旱区且对气候变化极为敏感的天山北坡为研究区, 基于MODIS数据反演地表温度, 以夜间灯光数据、人口分布数据及土地利用数据等共同表征人类活动强度, 分析2000—2018年人类活动强度与地表温度的演变特征, 并进一步探究二者的时空关联性。研究结果显示: ① 2000年以来天山北坡平均人类活动强度(0.11)较低, 整体呈阶梯式缓慢上升趋势(0.0024 a^{-1}), 其中人类活动强度较建设用地和人口规模增加滞后1~2 a。② 天山北坡年均地温为 $7.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且呈显著升温态势, 变化率($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)约为全球的2.33倍, 春季显著增温($0.068\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)对整体升温的贡献最大; 受高程和植被覆盖度等下垫面性状的显著影响, 研究区地温空间上呈南低北高特征。③ 天山北坡人类活动区人类活动强度与地表温度显著正相关, 呈东强西弱分布特征, 其空间分异与相关性的表达受到人类活动范围、表现形式及土地利用变化等因素的综合影响, 农林种植、城市绿化和植树造林等与植被相关的人为干预能够有效减弱人类活动造成的地表增温。本文不仅为人类活动强度的精细刻画提出了新思路, 更可为区域人地协调和统筹发展等提供科学参考。

关键词: 人类活动; 定量表征; 夜间灯光数据; 人口分布; 关联分析; 天山北坡

DOI: 10.11821/dlxb202205014

1 引言

人类生存发展过程中不同规模和类型的活动, 对地球各大圈层均产生了持续且深远的影响, 其影响又会反作用于人类自身福祉^[1]。人类活动强度的界定、量化和时空表达是评价人类活动与生态系统和气候变化耦合关系的核心研究内容之一。IPCC第五次气候变化评估报告明确指出人类活动是20世纪中期以来全球气候变暖的主要原因^[2]。地表是近地面空气的主要直接热源, 全面客观且精细地刻画人类活动及其与地表温度的时空关联是解析气候变暖过程和机制的重要科学问题。

人类活动强度(Human Activity Intensity, HAI)是表征人类活动对一定区域产生扰动作用程度的综合指标, 能客观表征人类活动对陆地表层的利用、改造和开发程度^[1], 其定量表达是评价人类活动对生态环境影响的重要参数^[3]。随着社会经济的快速发展和人类生产生活方式的巨大转变, 人类改造自然的强度、深度和规模不断扩大, 人类活动趋于

收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2022-02-14

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: 陈泓瑾(1998-), 女, 重庆大足人, 硕士生, 主要从事人类活动强度评估与人地关系研究。

E-mail: ZLYZX@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

多元化、复杂化和综合化,为客观界定和表征当前人类活动强度带来了很大挑战。现有研究中,HAI的定量表达主要从人类活动的结果变化出发,如基于权重的多指标叠加分析^[4]、残差分析^[5]、人类足迹^[6-8]、土地利用变化^[1,9]等;选取指标主要有土地利用方式、景观类型与人口密度等,多为单因子量化,未能全面体现人类活动的动因和过程以致对区域人类活动的刻画尚显粗糙和片面。代表性的核心指标及综合量化分析有助于推进人类活动的全面刻画和多维表达。人口数量及其空间分布既能体现人类活动的原始动力和基本格局,又能反映人类活动过程、状态和结果的动态演变;土地作为人类活动的基本载体,其利用类型变化是人类对地表影响过程及结果的直观表现,也是当前定量表征HAI时的主要因子之一;夜间灯光数据能体现城市灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光^[10-11],因此可细化工矿用地、交通用地、城乡住宅和公共设施用地等建设用和耕地等地类内部人类活动的等级和空间分异,被广泛应用于建设用地提取^[11]、城市发展及空间结构评估^[12]、国内生产总值及能源消费^[14]、碳排放模拟^[15]、大气污染评价^[16]等与人类活动密切相关的领域。目前,HAI的度量尚未形成普适性强且广泛应用的综合指标算法^[1],而融合土地利用、人口分布与夜间灯光数据的表征体系有望进一步解释和细化人类活动的初始动力、演变进程和时空格局,有利于对HAI的全面表征和多维刻画,是从多视角对人类活动强度综合表征体系的进一步完善和深化,具有重要的理论价值和现实意义。

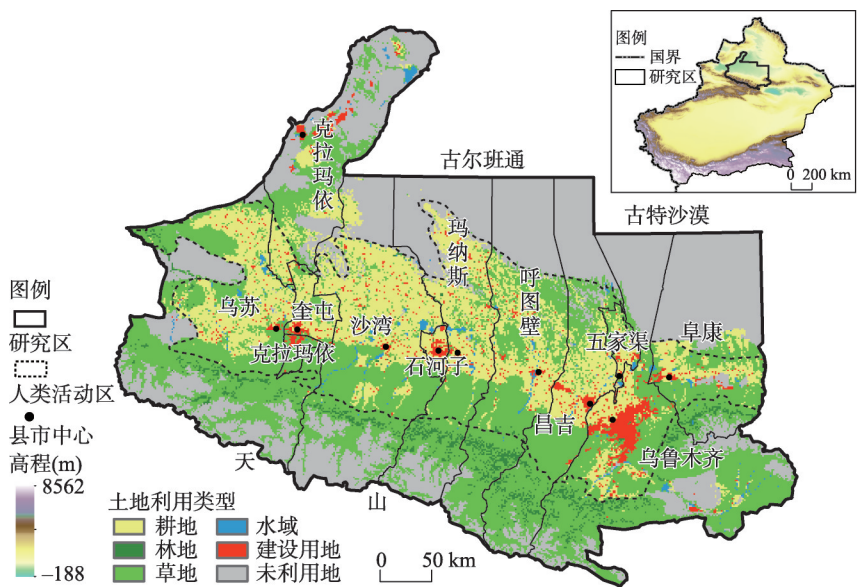
地表温度(Land Surface Temperature, LST)是全球及区域陆面过程及气候模式研究的重要参数。它通过改变地面与大气间的物质能量平衡,引起气温、降水与植被等时空格局发生连锁反应,进而对区域生态环境演变产生重要影响^[17]。目前基于遥感数据的地表温度研究已取得丰富成果,其中MODIS地温数据因其经济便捷、宏观及高时间分辨率等诸多优势而得到广泛使用,其精度已得到广泛认可^[18-19]。现有研究主要集中于中国中东部和华南等人口密集地区的地温变化^[19-21]、冷热岛效应^[22-23]等方面。影响地温的因素众多,已有研究表明土地利用类型对LST时空分布具有深刻的影响^[24-25],水体—林地—草地—裸地—建筑用地的LST依次升高^[25],NDVI与LST总体上呈负相关关系^[25-26]。人口集中意味着更强烈的地表改造、更多是资源消耗及人为热量排放,郭恒亮等^[26]与王刚等^[27]证实了人口密度对LST的显著正向影响;夜间灯光亮度综合了土地利用和人口因素,直接体现了社会经济活跃程度,沈中健等^[28]及胡李发等^[29]研究发现其与LST的正相关关系呈显著增强趋势。可见现有研究多为单因子相关性研究,而多因子综合联动分析较少,无法全面揭示地表温度的变化机制,也未能反映人类活动对LST的综合影响,因此HAI对LST及其时空分异的影响研究亟待拓展和深入。

中国西北干旱区生态环境脆弱且对气候变化敏感,其地表温度作为全球气候变化的指示器已受到各界高度关注^[30]。半个多世纪以来西北地区总体呈现由暖干向暖湿演变的趋势,新疆北部和天山一带尤为明显^[31-32]。天山北坡地区作为新疆政治、经济和文化的核心地带,是新疆人口最密集、人类活动最活跃的区域^[33],相关研究多从气温、土地利用变化和城市化过程等角度单独展开^[34-35],涉及区域人类活动与地温的时空关联研究尚有待拓展。故本文尝试从人类活动动因与结果、状态与过程的视角,将人口分布、夜间灯光及土地利用等数据有机结合,构建一个能准确客观反映人类活动对陆地表层影响和作用程度的HAI综合指标;采用斜率分析及相关分析等方法,对天山北坡人类活动强度与地表温度的时空分异特征、变化趋势及其时空关联性进行定量研究,评估HAI对天山北坡LST变化的影响,以期为积极应对气候变化、保护生态环境、合理开发资源及调节人类活动等提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

天山北坡位于42°55'N~46°13'N、83°25'E~88°58'E，地处天山中段北部、准噶尔盆地南缘，南临天山山区，北邻古尔班通古特沙漠，中部冲积平原分布着广阔的绿洲农业区和11个县市（图1）。研究区属典型的温带大陆性气候，地势东南高、西北低，自南向北依次为中高山带、前山带、绿洲、绿洲荒漠过渡带及沙漠等景观类型^[36]，植被覆被类型与气候变化之间存在明显的互动响应^[37]。由于中部冲积平原区适宜于农业发展，尤其是21世纪以来，耕地面积持续增长，城市化程度不断增强，天山北坡已成为新疆人类活动影响最显著的区域之一^[5]。



注：基于新疆维吾尔自治区地理信息公共服务平台新S(2020)191号标准地图制作，底图边界无修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 数据来源

本文使用的数据主要包括MOD11C3地温数据、土地利用（Land Use, LU）数据、植被指数（Normalized Differential Vegetation Index, NDVI）数据、DMSP/OLS及NPP-VIIRS两类夜间灯光（Night Time Light, NTL）数据和人口分布（Population Distribution, PD）数据等（表1）。其中MOD11C3用于地温时空分异特征分析；LU、DMSP/OLS及NPP-VIIRS两类夜间灯光数据及PD数据用于HAI的表征并分析其时空分布特征；NDVI数据反映下垫面植被覆盖变化情况。

2.3 研究方法

2.3.1 数据预处理 为了便于栅格计算和统计分析，所有数据均采用WGS-84坐标系及UTM投影，同时将MOD11C3和NPP-VIIRS数据重采样为1 km×1 km，以统一空间分辨率。

（1）MOD11C3：利用MRT软件批处理功能进行几何校正和重投影，并于ArcGIS10.3中进行镶嵌和裁剪，利用栅格计算器将K氏温度换算为摄氏温度。

表 1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据	空间分辨率	年份	数据来源
MOD11C3	0.05°×0.05°	2000—2019	ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search
LU	1 km×1 km	2005、2010、2015、2018	http://www.resdc.cn/Default.aspx
NDVI	1 km×1 km	2000—2018	http://www.resdc.cn/Default.aspx
DMSP/OLS	1 km×1 km	2000—2013	http://www.resdc.cn/Default.aspx
NPP-VIIRS	500 m×500 m	2013—2018	https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html
PD	1 km×1 km	2000—2018	https://landscan.ornl.gov/landscan-datasets

(2) 夜间灯光数据: ① 去饱和和处理。由于传感器辐射分辨率较低, DMSP/OLS数据在城市中心区存在大量亮度值饱和像元, 致使亮度等级无法区分, 需要进行去饱和处理。已有研究证明^[38], NDVI与DMSP/OLS的数值在空间上呈负相关关系, 故本文引入NDVI数据, 分别采用比值模型(RNVI)、归一化模型(NDNVI)和改进型模型(MDNVI)3种降饱和指数模型^[38]对DMSP/OLS亮度(NTL)进行去饱和处理, 对比分析后所得结果与潘竞虎等^[38]对夜间灯光数据去饱和效果类似, MDNVI对夜间灯光内部真实差异程度的刻画更细致, 对影像灰度值饱和区域的处理效果最突出(图2), 因此本文采用MDNVI模型对2000—2013年的DMSP/OLS数据进行降饱和处理。② DMSP/OLS与NPP-VIIRS整合。由于传感器参数、敏感程度及光谱响应方式不同, 两类影像的灰度值数量级差距较大, 无法直接同时使用。本文参考Li等^[39]与杨任飞等^[41]的数据整合方法, 选择交叉年份2013年影像为样本数据, 利用两类数据间的明显相关性, 以DMSP/OLS数据为基准, 用NPP-VIIRS数据拟合对应年份的DMSP/OLS数据, 将得到的拟合公式应用于2014—2018年NPP-VIIRS数据即可完成DMSP/OLS与NPP-VIIRS数据的整合。

2.3.2 人类活动强度表征 人类活动强度体现人类活动对陆地表层的影响程度, “人类对陆地表层覆被利用、改造和开发”可被视为人类活动的主体^[1], 但却并非全部。单一土地利用数据难以表征多元、复杂和综合的人类活动。本文以土地利用数据为基本框架, 辅以人口分布和夜间灯光数据, 注重人类活动过程、状态和结果的全程动态描述, 兼顾人类活动的宏观分布格局和微观等级差异的多尺度刻画, 构建HAI表征模型:

$$HAI=aN+bP+cL$$

(1)

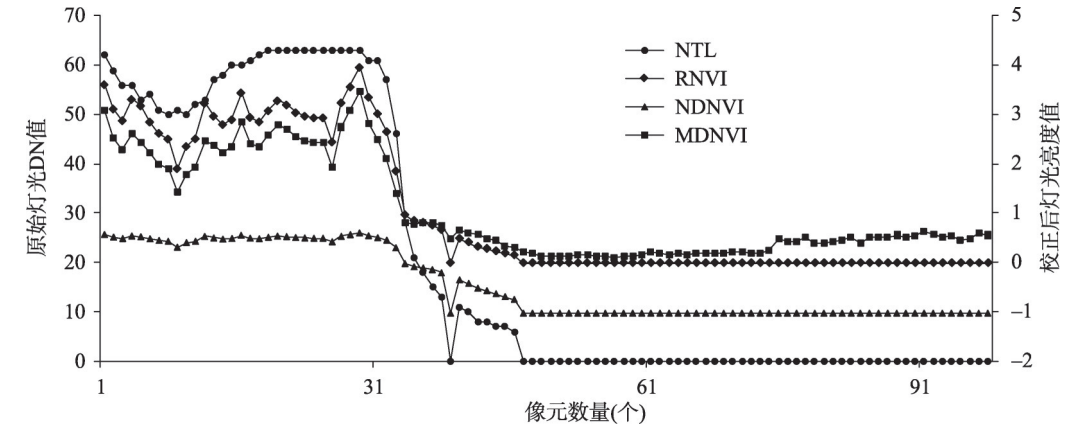


图2 2010年天山北坡纬向样带夜间灯光亮度值与降饱和指数值对比

Fig. 2 Comparison of night light brightness value and saturation index value of the zonal transect on the north slope of Tianshan Mountains in 2010

式中： HAI 为人类活动强度； N 、 P 、 L 分别表示归一化处理后的夜间灯光亮度、人口与土地利用数据； a 、 b 、 c 分别为NTL、PD和LU的权重。

a 、 b 、 c 权重由40余位专家以李克特5点量表打分评定为0.3、0.3和0.4，结果经肯德尔协调系数检验， $p < 0.001$ 表明评分具有显著一致性，结果可靠。而LU各地类权重在综合参考相关文献^[42-43]后采用AHP层次分析法确定（表2），归一化后参与HAI的计算。HAI取值在0~1之间，值越大表明人类活动越强，按照 $HAI = 0$ 、 $0 < HAI \leq 0.2$ 、 $0.2 < HAI \leq 0.4$ 、 $0.4 < HAI \leq 0.6$ 、 $0.6 < HAI \leq 0.8$ 和 $0.8 < HAI \leq 1$ ^[42]将人类活动分为极低、低、中低、中、中高与高6个强度等级。

表2 土地利用类型权重
Tab. 2 Weight of land use types

地类	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
权重	0.30	0.05	0.05	0.05	0.55	0.00

2.3.3 斜率分析法 斜率分析法可对不同的栅格变化趋势进行模拟^[44]，以分析不同时期地表温度及人类活动强度的空间变化特征。公式^[33]如下：

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \sum_{i=1}^n b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n b_i \right)^2}} \quad (2)$$

式中： θ 为年际变化率； n 为年数，本文取20； b_i 为时间序列值，2000—2019年依次取1~20； a_i 为第 i 年LST/HAI值。其中， $\theta < 0$ 和 $\theta > 0$ 分别表示HAI与LST随时间递减和递增； θ 绝对值越大，表明HAI与LST变化越快。

2.3.4 相关系数法 相关分析是一种分析变量间密切程度的统计学方法，通过计算年均HAI与LST之间的相关系数，能够有效反映变量间关联的密切程度，相关系数 R 取值区间为 $[-1, 1]$ ，公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (3)$$

式中： R 为相关系数； n 为年份数，取1~20； x_i 为归一化后的地表温度， y_i 为人类活动强度。其中， $R < 0$ 和 $R > 0$ 分别表示HAI与LST呈负相关和正相关关系； R 绝对值越大，表明相关性越强。本文按照 $-1 \leq R \leq -0.6$ 、 $-0.6 < R \leq -0.3$ 、 $-0.3 < R \leq 0$ 、 $0 < R \leq 0.3$ 、 $0.3 < R \leq 0.6$ 、 $0.6 < R \leq 1$ 将相关系数分为强负相关、较强负相关、弱负相关、弱正相关、较强正相关、强正相关6个等级。

3 结果分析

3.1 天山北坡人类活动强度时空特征

2000—2018年间天山北坡人类活动强度较低且整体呈阶梯式缓慢上升趋势，年均HAI为0.11，变化率为 0.0024 a^{-1} （图3）。2001—2003年研究区人口小幅增长，同时建设用地与耕地面积处于扩张阶段，在三者的共同影响下研究区HAI呈小幅增长，接着进入长达近10年的平台期，随后于2012—2015年间人口快速增长，叠加建设用地与耕地面积

的增长导致HAI显著升高。可见HAI主要受人口和建设用地影响,且存在1~2年的滞后期,而受其他地类影响相对较小(图3b),也反映出单纯使用LU表征HAI的片面性以及用PD解释HAI变化的合理性。

研究区HAI呈中部高、南北低的空间分异特征(图4a)。南部山区、北部荒漠区和低山草原带为人类活动低、极低强度等级区域,面积占比76.2%;耕地主要为中低强度等级区,高强度与中高强度区域集中分布在城市中心区,如乌鲁木齐市、石河子市及克拉玛依市等城市HAI均在0.73以上。从空间分布来看,各县市HAI空间分布符合城市发展的圈层结构特征(图4b),表现为HAI及其变化率自中心城区向城市外缘及周边耕地、草地、荒漠逐渐衰减,以乌鲁木齐市最为典型;而中心城区外围的HAI变率高值区均为散布于耕地中的农村居民点。从HAI各等级面积占比的年际变化情况来看,人类活动极低强度等级(未利用地)面积占比由2000年的49.48%大幅减少至2018年的6.93%,其余各等级面积均呈增加趋势,以中低强度等级(主要为耕地,占比41.96%)最为显著。可见研究区人类活动范围不断扩张且对周边地区的辐射影响范围不断扩大,HAI变化遵循距离衰减规律。

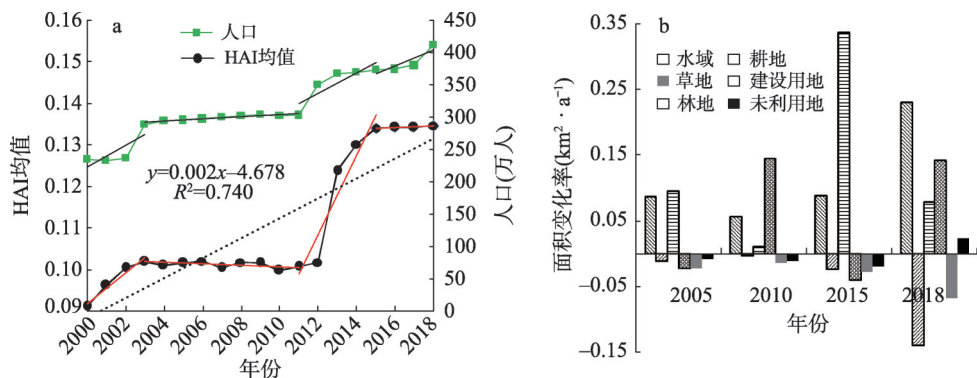


图3 2000—2018年天山北坡年均HAI与人口数量变化及各地类面积变化率

Fig. 3 Annual average HAI and population changes and area change rate of various land use types on the north slope of Tianshan Mountains, 2000-2018

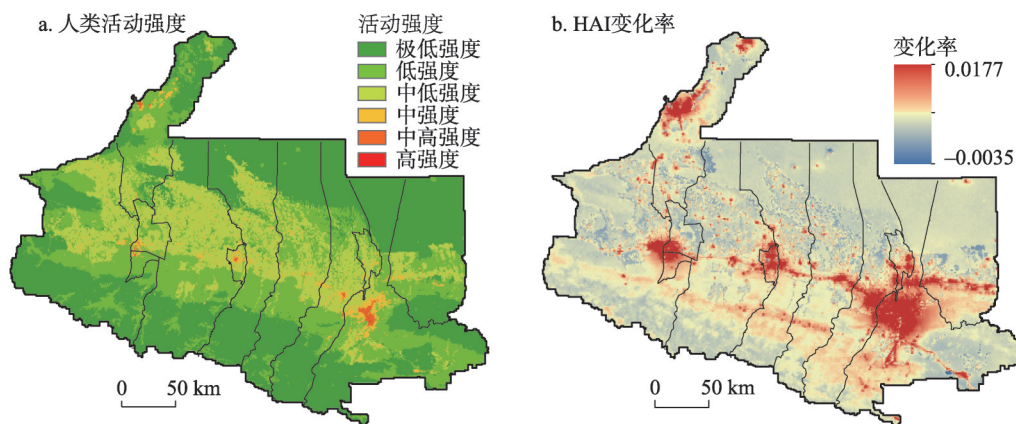


图4 2000—2018年天山北坡人类活动强度及变化率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the intensity and change rate of human activity on the north slope of Tianshan Mountains, 2000-2018

2000—2018 年天山北坡 HAI 较低, 年变化率仅 0.0024 a^{-1} , 总体呈小幅缓慢增长趋势。与基于不同尺度的研究结果相比增长率极小, 如全国 0.038 a^{-1} ^[1]、海南省 0.061 a^{-1} ^[45], 侧面反映出由于历史原因和区位、地缘等条件限制, 研究区社会经济发展相对滞后且增长缓慢。研究区 HAI 正增长区域占比 99.33%, 且自中心城区向外围快速衰减, HAI 在农村分散居民点周边明显增大, 而其他地类变化不大, 这主要缘于人口的向心性聚集、城市工业投资增加^[46]、居民住宅、工矿用地和道路建设等规模扩大 (图 3b), 边缘土地持续向建设用地转变 (图 1、图 4b), 体现了城市规模的扩张和发展动向。

3.2 天山北坡地表温度时空变化特征

研究期内天山北坡年均 LST 为 $7.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最冷年和最热年分别为 2003 年 ($6.03\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 2015 年 ($8.21\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2006 年和 2008 年四季地温均高于多年均值。2019 年研究区 LST 较 2000 年升高 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年均变化率达 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, 整体呈显著的波动上升趋势 (图 5a) 且远强于全球升温幅度 ($(0.0086\pm0.006)\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[47])。2000—2019 年来春、夏、冬三季均呈升温趋势, 以正距平年份居多, 其中春季 ($0.068\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) 的显著增温对研究区整体升温有绝对贡献 (图 5a), 但春季地温负距平幅度却较大, 多地频现极端低温^[48]; 夏季地温相对稳定, 而冬季波动较大, 且近几年冬季增温幅度有增大趋势。

研究区 LST 整体南低北高, 空间分异显著。由研究区中部的经向剖面线 LST 统计发现 (图 6b), 南部山区 LST 随海拔上升显著下降, 相关系数达 -0.84 , 呈显著负相关关系, 直观体现了地温垂直地带差异。在山前冲积平原呈条带状分布的城区地温明显高于两侧的天然植被和耕地, 最高可达 $15.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 存在明显的“热岛效应”, 主要原因在于工业、交通及生活等人工热量排放, 城区不透水地表小比热容、高蓄热和低散失的物理特性, 以及大气污染物的“保温”作用。准噶尔盆地南缘荒漠区由于自身的小比热容, 同

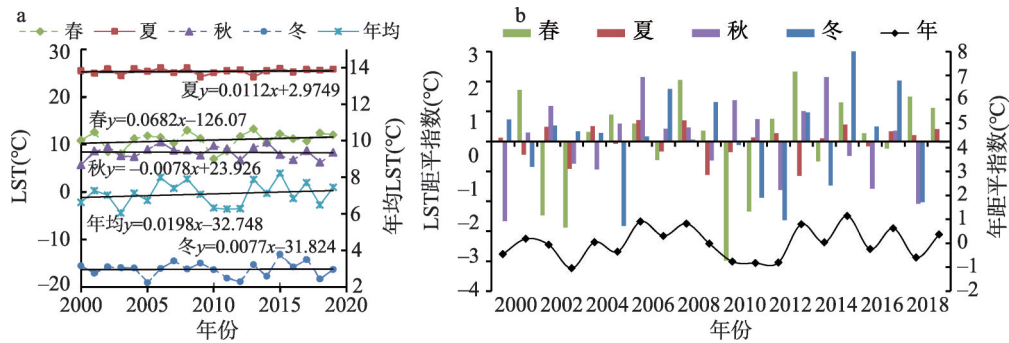


图5 2000—2019年天山北坡平均地表温度及季节变化与地温距平指数

Fig. 5 Annual average surface temperature, seasonal variation and anomaly index on the north slope of Tianshan Mountains, 2000-2019

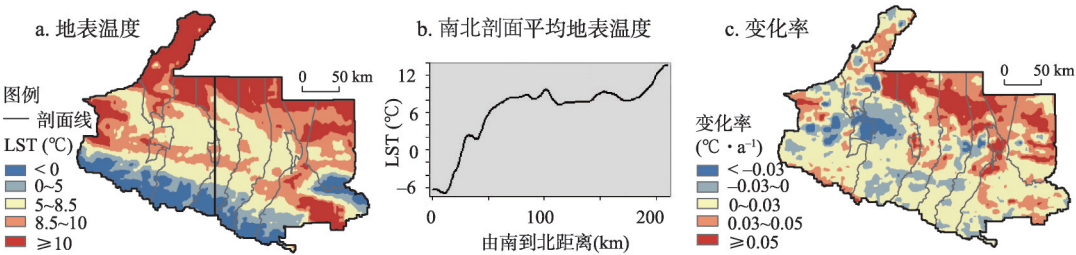


图6 2000—2019年天山北坡年均地表温度及年际变化率

Fig. 6 Average annual surface temperature and inter-annual rate of change on the north slope of Tianshan Mountains, 2000-2019

时缺乏植被蒸散加湿和遮阴的降温作用, LST普遍较高。可见海拔与下垫面打破了研究区地温自南向北沿纬向逐渐升温的递变特征, 其中人类活动作为重要“营力”通过改变土地利用方式在地温变化过程中扮演了重要角色。

2000—2018年天山北坡LST整体上升幅度较大, 变化率亦呈南低北高, 空间差异显著(图6c), 升温区面积约为降温区的4.6倍, 地表裸露、植被稀疏的荒漠区和城市及周边区域主要呈现升温。准噶尔盆地南缘沙漠/荒漠区增温最为显著, 变化率达 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。人口密集的城乡建设用地多为不透水表面, 因其更大的吸热率和更小的比热容使得地表升温迅速, 加上生产生活废热排放和大气污染物的保温作用, 成为区域热岛和升温主导区。例如乌鲁木齐周边县市、呼图壁及玛纳斯—石河子一带中心城区呈现明显的热区, 部分地区LST变化幅度超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。而奎屯—乌苏一带却存在显著的冷区, 经统计发现, 奎屯市NDVI自0.29升至0.62, 市内大量天然草地转变为耕地, 在以开荒和农业种植为主的人工干预下虽仍为植被, 但长势更旺盛且覆盖度显著升高, 地表反照率减小、土壤湿度增加, 应是该区域降温的原因之一, 也印证了植被覆盖和人类活动引起的下垫面物理及生物性质的转变与地温变化密切相关。尤其值得关注的是乌苏和阜康南部部分高海拔山区呈现较明显的升温趋势, 地温的升高会加剧冰川消融, 同时周边裸岩增多吸热加剧和下垫面反射率降低会使得地温进一步升高^[49], 正如王璞玉等^[50]研究得出乌鲁木齐河源1号冰川在1959—2010年间冰川储量变化率高达 $-291.82\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 便是该区域地表温度升高明显的很好佐证, 冰川加速消融的风险提升将对研究区生态环境、工农业发展与社会经济造成深远影响^[51]。

3.3 HAI与LST时空关联性分析

由于南部山区与北部荒漠区人迹罕至, 故本文聚焦研究区中部的人类主要活动区域(图1)探究HAI与LST的时空关联。经空间相关分析发现, HAI与LST显著正相关, 呈东强西弱分布(图7)。正相关区域面积占比94.6%, 主要为耕地与建设用地, 其中73.7%的区域为较强及强正相关, 以乌鲁木齐市(0.78)与五家渠市(0.84)最为显著, 阜康市及昌吉市中部人类活动强度明显增强(图4), 呈强正相关。中北部地区由于耕地的大面

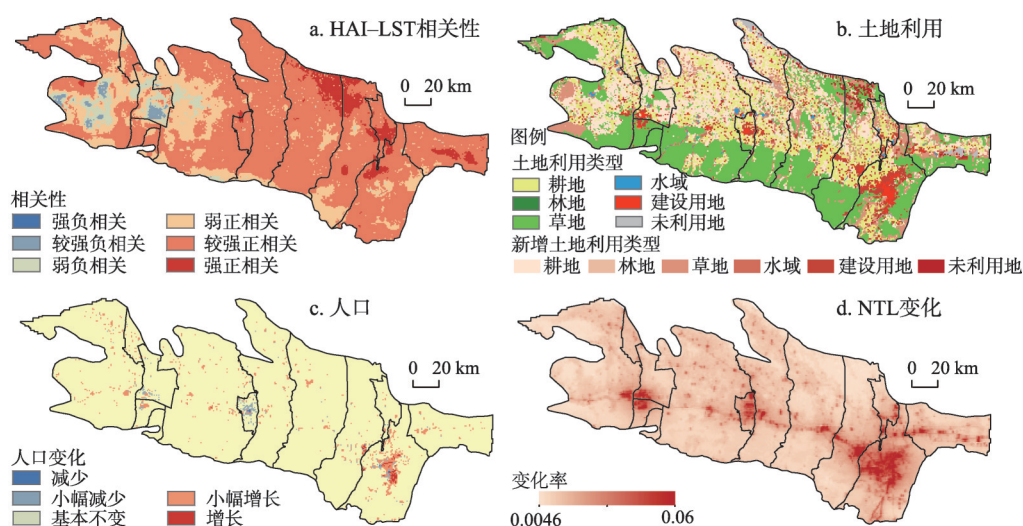


图7 2000—2018年天山北坡地表温度与人类活动强度相关性、土地利用变化、人口及NTL变化率

Fig. 7 The correlation between surface temperature and human activity intensity, land use change, population and NTL change rate on the north slope of Tianshan Mountains, 2000-2018

积增加,内部农村居民点的扩张、各县市中心的城建用地大幅增加以及NTL升高等的共同作用,HAI与LST普遍呈较强正相关,而强正相关区域除昌吉市北部未利用地增多、五家渠市农村居民点小幅扩张外,其余土地利用类型并未发生明显变化(图7b),LST的升高应与人口的小幅增长(图7c)、夜间灯光亮度提升(图7d)存在正相关关系;南部大片草地区域多年来人口数量变动不大,但内部耕地与水域周边农村居民点面积增加,NTL普遍升高,HAI与LST也呈较强正相关。此外,乌鲁木齐市南部耕地扩张明显,农村居民点及城建用地增加,人口与NTL增幅也较大,HAI与LST相关性有增强趋势。

HAI与LST呈负相关的区域较少,仅位于乌苏市与奎屯市周边的小面积耕地与草地区域,在HAI小幅增强的情况下LST降温显著,呈显著负相关(图7)。结合人类活动在不同土地利用类型上的表现形式,并比对发现该区域多年来NDVI持续增大,植被的降温效应是致其负相关的主导因素。以奎屯市为例(图8),近20年面积占比42.78%的稀疏草地转化为覆盖度更高的耕地(图8e、8f),虽然地类发生改变但仅从天然植被变为人工植被,其本质没有变化,此外在人口数量基本不变的情况下夜间灯光强度小幅提升,故区域HAI仅为小幅增强。区域NDVI由0.30升至0.62(图8g、8h),LST降低了4.66℃,且同年耕地NDVI(0.73)比草地高0.25,LST则比草地低0.48℃,可见农作物的遮阴、

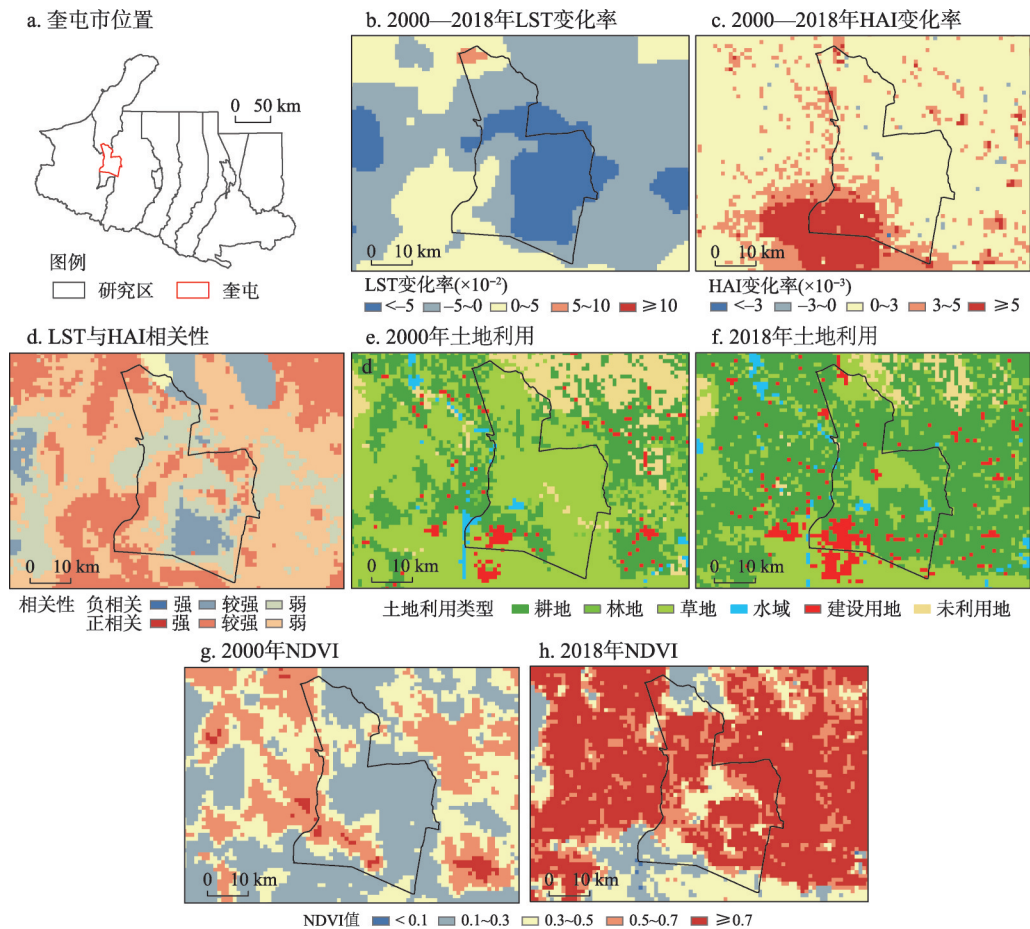


图8 2000—2018年奎屯市LST、HAI、土地利用类型及NDVI变化
Fig. 8 LST, HAI, Landuse, NDVI and their changes in Kuitun, 2000-2018

吸热和增湿作用逐渐凸显从而显著降低地温。总体来看,以开荒和农业种植为主的人类活动使得人工管控下的农作物比天然植被生长更旺盛,覆盖度更高,加上农业灌溉等农事活动加强了降温效应。以此类推,农林种植栽培、城市绿化和植树造林等与植被相关的人类绿化养护活动,能够显著抑制地表温度的升高。

综上,天山北坡人类活动区内HAI与LST显著相关且呈增强趋势,其空间分异受到人类活动范围、表现形式、土地利用变化等因素的综合影响,其中人口不断增长、建设用地向耕地、草地的扩张与垦荒等导致下垫面性状改变的人类活动是研究区地温变化的主要原因,人口分布和夜间灯光的变化可支持LST时空变化的合理解释。

4 讨论

4.1 人类活动强度及表征方法

对于HAI的定义与表征,目前多基于土地利用单因子^[1, 9, 52]或结合区域经济数据、景观类型、人口密度等数据^[3]。其中包括刘采等^[45]与Xu等^[1]提出的建设用地面积当量因子法表征HAI,韩美等^[9]基于不同土地利用类型的影响力与权重进行加权综合计算HAI,荣益等^[53]通过区域景观类型的人为影响参数得到HAI,薛陈利等^[54]以人口密度反映HAI的变化。无论是土地利用类型/景观类型或是人口密度的变化,都仅仅只能体现人类活动影响的某一部分,而无法展现人类活动的全景影像。在现有众多HAI研究中,采用生态系统综合人类扰动指数赋值方案(以下简称综合赋值方案),在中国国家尺度土地利用数据基础上研制的多期长江经济带的人类活动强度数据集^[52]比较有代表性,综合赋值方案仅以土地利用数据作为度量HAI的依据。为对比不同方案的合理性和适用性,按综合赋值方案计算天山北坡HAI,并与本文结果分别归一化处理(图9),对比分析发现,由于综合赋值方案受各土地利用类型的面积占比的强烈影响^[55],天山北坡草地(39.8%)、未利用地(33.7%)与耕地(20.7%)面积远大于建设用地(2.5%),在各地类赋值级别一定的情况下,赋值级别低但面积占比大的耕地与草地区域HAI偏高且区分度不高(图9b),而人类活动最集中、最强烈的建设用地HAI偏低。而本文结果不仅能够反映人类活动强度的宏观分布格局,还可细化不同地类内部HAI空间差异。正如其数据集作者所言,“综合赋值方案未能充分体现人类对生态系统的多方面扰动,是对HAI的保守估计”^[52]。地广人稀、建设用地面积占比较小情况在干旱、半干旱地区以及广大欠发达地区非常普

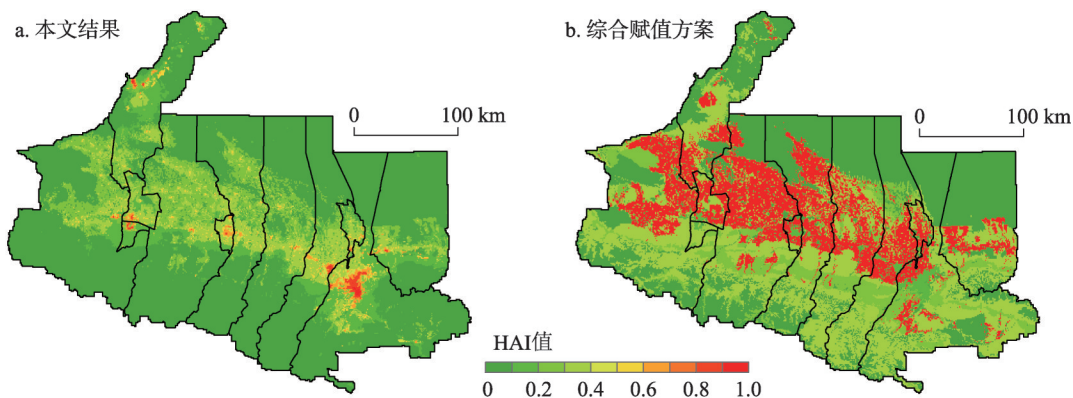


图9 2018年天山北坡人类活动强度不同表征方式结果对比

Fig. 9 Comparison of different representations of human activity intensity on the north slope of Tianshan Mountains in 2018

遍。相比之下, 本文将土地利用数据与人口分布数据、夜间灯光数据相结合, 更全面地考虑了扰动生态环境的动力和状态、过程和结果, 在城镇及周边区域的结果更为客观, 不同地类间受人类活动扰动程度的刻画对比也更为合理, 故本文构建的 HAI 表征体系相对更具普适性。

尽管许多学者对夜间灯光数据在 HAI 的表征方面均有积极的评价与期待^[11, 56], 但目前仍处于探索的初步阶段。虽然段群滔等^[4]、Sanderson 等^[5]与 Venter 等^[6]已将夜间灯光数据引入人类活动强度研究, 但大多仅采用 DMSP/OLS 数据, 由于其在 2013 年后的数据缺失, 导致所表征的人类活动强度指数存在时间上的不连续性与数据的低时效性问题, 无法体现区域人类活动强度的近况与连续变化趋势。本文尝试使用连续夜间灯光数据、人口分布数据及土地利用数据结合的方式表征人类活动强度, 可作为今后人类活动强度表征的参考和有益补充, 当然, 以夜间灯光数据为基础更好地表征人类活动强度的方法还需要在今后的研究中发掘。

4.2 人类活动对地表温度的影响

天山北坡人类活动区内 HAI 与 LST 整体呈正相关且有增强趋势, 且土地利用、人口分布和夜间灯光的变化可支持 LST 时空变化的合理解释, 与前人^[57-59]结论相符, 人类活动对地表温度确有显著影响。由于人类活动的类型与表现形式多样, 对 LST 的影响也有所差异, 土地利用方式作为人类活动的最直观体现, 可探讨不同类型人类活动对地温的影响。

采用空间分区统计方法定量分析各阶段人类活动区土地利用变化区域的地温变化 (图 10)。因地类转换类型比较复杂, 且面积较小的转换地类地温变化存在较大的不确定性, 故本文仅统计面积占比最大的 6 种转化类型。由耕地、草地转化而来的建设用地因不透水面面积增加导致热岛效应增强^[60-61], LST 平均升温在 2000—2005 年最高, 达到 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$; 2005—2010 年建设用地区域表现的降温 ($-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$), 是较大面积荒漠、裸地等未利用地转为建设用地导致, 可见同为建设用地扩张, 人类对不同地类的改造会对地温造成不同的影响。当人类活动表现为植被破坏^[62]以致次生型未利用地增加、植被退化等的行为时, 森林草地等自然植被被破坏、土地被弃耕而转为稀疏草地甚至未利用地, 以致转为未利用地与草地普遍呈现升温状态。研究区新增的未利用地主要分布在北部荒漠区, 因植被退化、土地弃耕等而裸露的地表含水率降低、比热容变小导致 LST 平均升温 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$, 在 2010—2015 年升温最显著 ($0.58\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$), 是全球升温幅度的 13.49 倍。当人类活动表现为开荒与植被恢复等时, 其伴随的荒漠、裸地减少与植被覆盖度的升高有显著的降温效果^[25, 63], 本区新增耕地、林地的 LST 因植被覆盖度和含水率提高而分别降温 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$ 和 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}$ 。新增水体因更大的比热容而降温, 具有更好的区域温度调节能力。在地类保持不变的区域地温亦呈增温趋势, 其中建设用地内部增温最显著, 其人口数量对 LST 的影响最高为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 5\text{a}^{-1}\cdot \text{千人}^{-1}$, 而归一化夜间灯光亮度每增加 0.01, LST 最多升高 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当人口数量和密度

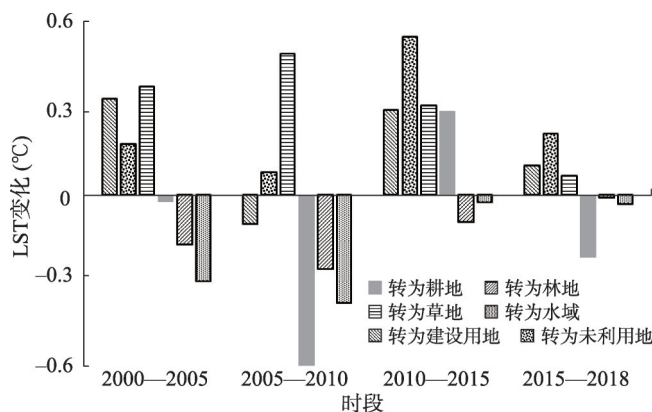


图 10 土地利用方式转换区域地温变化

Fig. 10 Surface temperature change in land use type conversion area

增大、夜间灯光亮度增强,意味着土地开发利用强度增大、社会经济活跃程度提升、人类生产生活和能源消耗的集约化水平提高,直接导致LST的显著升高^[26-29]。当然,人类活动的类型与表现对LST的影响呈现各向异性和交叉渗透性,不同规模和形式的人类活动对地温影响的量化还需在今后的研究中进一步探索。

5 结论与展望

基于夜间灯光、人口、土地利用数据表征人类活动强度指数HAI,并对2000—2018年天山北坡HAI与LST的时空分异特征及空间关联性进行了多尺度分析。主要结论如下:

(1) 天山北坡人类活动强度较低,年均HAI为0.11,整体呈阶梯式缓慢上升趋势(0.0024 a^{-1}),主要受建设用地和人口增加影响,且存在1~2 a滞后期;HAI中部高、南北低,并自中心城市带向外围耕地、草地、荒漠和山区逐渐减小;2000—2018年HAI整体呈小幅缓慢增长趋势,极低强度区域大幅减少,而中低强度区域显著扩大。

(2) 2000—2019年天山北坡LST显著快速升温,年均LST为 $7.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化率($0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)约为全球的2.33倍,春季的显著增温($0.068\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)对整体升温贡献最大;空间上呈南低北高特征,并受高程和植被覆盖度等下垫面性状的影响显著。其自南向北逐渐升温的分布特征在海拔与下垫面的影响下,打破了温度纬向递减规律,其中人类活动在地表温度变化过程中扮演重要角色。

(3) 天山北坡人类活动区内HAI与LST显著正相关,整体呈东强西弱分布,其空间分异与相关性的表达受到人类活动范围、表现形式及土地利用变化等因素的综合影响,人口分布和夜间灯光的变化可支持LST变化的合理解释。农林种植栽培、城市绿化和植树造林等与植被相关的人为干预能够有效减弱人类活动造成的地表增温。

本文受夜间灯光与人口分布等数据时序限制,可能无法全面反映地温变化的波动周期和更长时间序列趋势,但其与HAI之间的空间关联却是显著而客观的,因此仍旧对人类活动影响的评估有较确切的解释作用。另外,本文主要考虑了人类活动对生态系统的直接扰动,未能体现全球尺度下的间接影响,如大气污染物的远距离扩散和传输、碳排放造成的全球基础温度的升高(非本地区直接造成)等。此外引入污染物浓度、交通出行、兴趣点、社交媒体等大数据应该能更广泛细致且多维度的改进HAI的表征方法,需在今后的研究中继续深入探讨。

参考文献(References)

- [1] Xu Y, Xu X R, Tang Q. Human activity intensity of land surface: Concept, methods and application in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1349-1361.
- [2] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076. [沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.]
- [3] Liu Shiliang, Liu Lumeng, Wu Xue, et al. Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6797-6809. [刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 等. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. *生态学报*, 2018, 38(19): 6797-6809.]
- [4] Duan Quntao, Luo Lihui. A dataset of human footprint over the Qinghai-Tibet Plateau during 1990-2015. *China Scientific Data*, 2020, 5(3): 303-312. [段群滔, 罗立辉. 1990—2015年青藏高原人类足迹数据集. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2020, 5(3): 303-312.]
- [5] Yin Xiaojun, Zhu Honghui, Gao Jerry, et al. Effects of climate change and human activities on net primary productivity in the Northern Slope of Tianshan, Xinjiang, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 195-202. [尹小君, 祝宏辉, Gao Jerry, 等. 气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 195-202.]

- [6] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891-904.
- [7] Venter O, Sanderson E W, Magrach A, et al. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12558. DOI: 10.1038/ncomms12558.
- [8] Venter O, Sanderson E W, Magrach A, et al. Global terrestrial human footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific Data*, 2016, 3(1780): 160067. DOI: 10.1038/sdata.2016.67.
- [9] Han Mei, Zhang Cui, Lu Guang, et al. Response of wetland landscape pattern gradient to human activity intensity in Yellow River Delta. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 265-274. [韩美, 张翠, 路广, 等. 黄河三角洲人类活动强度的湿地景观格局梯度响应. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 265-274.]
- [10] He C Y, Shi P J, Li J G, et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(13): 1614-1620.
- [11] Wang Herao, Zheng Xinqi, Yuan Tao. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 11-19. [王鹤尧, 郑新奇, 袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 11-19.]
- [12] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72.
- [13] Ma T, Zhou Y K, Zhou C H, et al. Night-time light derived estimation of spatio-temporal characteristics of urbanization dynamics using DMSP/OLS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 453-464.
- [14] Hu Yunfeng, Zhao Guanhua, Zhang Qianli. Spatial distribution of population data based on nighttime light and LUC data in the Sichuan-Chongqing Region. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(1): 68-78. [胡云锋, 赵冠华, 张千力. 基于夜间灯光与 LUC 数据的川渝地区人口空间化研究. *地球信息科学学报*, 2018, 20(1): 68-78.]
- [15] Foster J L. Observations of the earth using nighttime visible imagery. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 1983, 414(6): 187. DOI: 10.1117/12.935885.
- [16] Zhang Yongnian, Pan Jinghu. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1436-1446. [张永年, 潘竞虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1436-1446.]
- [17] Guan Yanlong, Wang Ranghui, Li Cheng, et al. Variation characteristics of ground surface temperature in northern piedmont of Tianshan Mountains during 1963-2010. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(4): 587-594. [管延龙, 王让会, 李成, 等. 天山北麓 1963—2010 年 0 cm 最高与最低地表温度变化特征. *干旱气象*, 2015, 33(4): 587-594.]
- [18] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(3): 335-346.
- [19] 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.]
- [20] 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.]
- [21] Christelle V, Pietro C, Tufa D, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 114(2): 449-465.
- [22] Zhang Jiahua, Hou Yingyu, Li Guicai, et al. Satellite remote sensing research and impact factor analysis of diurnal variation and seasonal characteristics of heat island in Beijing and its surrounding areas. *Science in China: Series D*, 2005, 35(Suppl.1): 187-194. [张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 1): 187-194.]
- [23] Marc L I, Ping Z, Robert E W, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 114(3). DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.008.
- [24] Reyilai Kadeer, Yusupujiang Rusuli, Gao Qian, et al. Spatiotemporal response of land surface temperature to land use/cover change in Yanqi Basin, Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 259-266. [热伊莱·卡得尔, 玉素甫江·如素力, 高倩, 等. 新疆焉耆盆地地表温度时空分布对 LUCC 的响应. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 259-266.]
- [25] Lu Yan, Yu Wenbing, Guo Ming, et al. Spatiotemporal variation characteristics of land cover and land surface temperature in Mohe County, Heilongjiang Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1137-1149. [陆妍, 喻文兵, 郭明, 等. 黑龙江省漠河地区土地覆被与地表温度时空变化特征研究. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1137-1149.]

- [26] Guo Hengliang, Feng Zhenzhen, He Xiaohui, et al. The impact of surface cover and population density on urban land surface temperature: A case study of Zhengzhou city. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Nature Science Edition)*, 2019, 48(4): 298-306. [郭恒亮, 冯珍珍, 赫晓慧, 等. 地表覆被与人口密度变化对城市地表温度的影响分析: 以郑州市为例. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2019, 48(4): 298-306.]
- [27] Wang Gang, Zhang Qiuping, Xiao Rongbo, et al. On impacts of land use, population density and altitude on the urban heat island. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 41(1): 82-90. [王刚, 张秋平, 肖荣波, 等. 土地利用、人口密度及海拔对城市热岛的影响. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 82-90.]
- [28] 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.]
- [29] Hu Lifa, Xie Yuanli, Cui Siying, et al. The characteristics and driving forces of summer urban heat island in Guanzhong Plain urban agglomeration. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3842-3852. [胡李发, 谢元礼, 崔思颖, 等. 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.]
- [30] Ouyang Bin, Che Tao, Dai Liyun, et al. Estimating mean daily surface temperature over the Tibetan Plateau based on MODISLST products. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 296-303. [欧阳斌, 车涛, 戴礼云, 等. 基于MODISLST产品估算青藏高原地区的日平均地表温度. 冰川冻土, 2012, 34(2): 296-303.]
- [31] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.]
- [32] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the characteristics and trend of climate transition from warm and wet in western China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.]
- [33] Guan Yanlong, Wang Ranghai, 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数据的天山区域地表温度时空特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 681-688.]
- [34] Liu Chao, Yan Xiaoyue, Jiang Fengqing. Influence of precipitation distribution on desert vegetation of northern piedmont, Tianshan Mountains: Analysis based on daily NDVI and precipitation data. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7790-7804. [刘超, 闫小月, 姜逢清. 天山北坡前山带降水分布型对荒漠植被的影响: 基于逐日降水数据和NDVI的分析. 生态学报, 2020, 40(21): 7790-7804.]
- [35] Qi Yaxiao, Zhang Fei, Chen Rui, et al. Vegetation coverage dynamics in northern slope of Tianshan Mountains from 2001 to 2015. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3677-3687. [齐亚霄, 张飞, 陈瑞, 等. 2001—2015年天山北坡植被覆盖动态变化研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3677-3687.]
- [36] Luo Geping, Chen Xi, Hu Ruji. Vegetation change during the last 10 years derived from satellite image in the north slopes of the Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 237-242. [罗格平, 陈嘻, 胡汝骥. 基于AVHRR/NOAA影像的天山北坡近10a植被变化. 冰川冻土, 2003, 25(2): 237-242.]
- [37] Sun Qinming, Liu Tong, Han Zhiquan, et al. Response of climate changes on vegetation cover in north of Tianshan Mountains evaluates using multiple time scales. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 248-255. [孙钦明, 刘彤, 韩志全, 等. 遥感分析天山北部植被覆盖对气候变化的多时间尺度响应. 农业工程学报, 2014, 30(15): 248-255.]
- [38] Pan Jinghu, Li Junfeng. Estimate and spatio-temporal dynamics of electricity consumption in China based on DMSP/OLS images. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 627-638. [潘竞虎, 李俊峰. 基于夜间灯光影像的中国电力消耗量估算及时空动态. 地理研究, 2016, 35(4): 627-638.]
- [39] Zhang Q L, Schaaf C, Seto K C. The vegetation adjusted NTL urban index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129(2): 32-41.
- [40] Li X, Li D R, Xu H M, et al. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian Civil War. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5934-5951.
- [41] Yang Renfei. Integrating DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data to the application research of urban agglomeration growth process [D]. Chongqing: Southwest University, 2018. [杨任飞. 基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS整合数据的城市群发育过程研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.]
- [42] Wang Lijia, Li Jialin, Tian Peng, et al. Impacts of human activity on coastal wetland land cover changes related to reclamation on the south coast of Hangzhou Bay. *Shanghai Land & Resources*, 2020, 41(1): 4-10. [王丽佳, 李加林, 田鹏, 等. 杭州湾南岸围垦土地人类活动强度及对滨海湿地覆被类型的影响. 上海国土资源, 2020, 41(1): 4-10.]
- [43] Zhang Cuiyun, Wang Zhao. Quantitative assessment of human activity intensity in the Heihe Catchment. *Advance in*

- earth sciences, 2004, 19(Suppl.1): 386-390. [张翠云, 王昭. 黑河流域人类活动强度的定量评价. 地球科学进展, 2004, 19(增刊1): 386-390.]
- [44] Wei Fengying. Statistic Diagnostic and Forecast Technologies in Climatology. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 29-35. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 29-35.]
- [45] Liu Cai, Zhang Haiyan, Li Qian. Spatiotemporal characteristics of human activity intensity and its driving mechanism in Hainan province from 1980 to 2018. Progress in Geography, 2020, 39(4): 567-576. [刘采, 张海燕, 李迁. 1980—2018年海南省人类活动强度时空变化特征及其驱动机制. 地理科学进展, 2020, 39(4): 567-576.]
- [46] Zhong Chongxi, Zhou Yuezhi. Population distribution and regional economic development in Economic Belt at north slope of Tianshan. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(6): 33-38. [仲崇玺, 周跃志. 天山北坡经济带人口分布与经济发展研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(6): 33-38.]
- [47] Yun Xiang. Improvement of surface temperature and warming analysis [D]. Beijing: China Meteorological Science Research Institute, 2019. [云翔. 全球地表温度数据的改进以及增暖分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.]
- [48] Mao Weiyi, Chen Ying, Cao Xing. Evaluation index of cold wave intensity at a single station and its application in Urumqi. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(5): 139-146. [毛伟峰, 陈颖, 曹兴. 单站寒潮降温过程强度评估指标及其在乌鲁木齐市的应用. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 139-146.]
- [49] Huang Fangfang, Ma Weiqiang, Li Maoshan, et al. Analysis on responses of land surface temperature on the northern Tibetan Plateau to climate change. Plateau Meteorology, 2016, 35(1): 55-63. [黄芳芳, 马伟强, 李茂善, 等. 藏北高原地表温度对气候变化响应的初步分析. 高原气象, 2016, 35(1): 55-63.]
- [50] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Analysis of the relation between glacier volume change and area change in the Tianshan Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 9-15. [王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 天山冰川储量变化和面积变化关系分析研究. 冰川冻土, 2017, 39(1): 9-15.]
- [51] Zhang Z Y, Liu L, He X L, et al. Evaluation on glaciers ecological services value in the Tianshan Mountains, Northwest China. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1): 101-114.
- [52] Li Shicheng, Zhang Xuezen. Land use-based human activity intensity along the Yangtze River Economic Belt, China (1970s-2015). China Scientific Data, 2018, 3(3): 15-22. [李士成, 张学珍. 基于土地利用的长江经济带1970s末至2015年人类活动强度数据集. 中国科学数据(中英文网络版), 2018, 3(3): 15-22.]
- [53] Rong Yi, Li Chao, Xu Ce, et al. Ecosystem service values and spatial differentiation changes during urbanization: A case study of Huanghua City. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1374-1381. [荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例. 生态学报, 2017, 36(5): 1374-1381.]
- [54] Xue Chenli, Zhang Huiqiong, Zou Tao, et al. Ecological quality and its relationships with human activities in China-Laos railway economic belt. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 638-648. [薛陈利, 张会琼, 邹滔, 等. 中老铁路经济带生态质量及其与人类活动的关系. 应用生态学报, 2021, 32(2): 638-648.]
- [55] Zhao G S, Liu J Y, Kuang W H, et al. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China: 1990-2010. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 515-529.
- [56] Chen Yingbiao, Zheng Zihao, Wu Zhifeng, et al. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data. Progress in Geography, 2019, 38(2): 205-223. [陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望. 地理科学进展, 2019, 38(2): 205-223.]
- [57] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. Scientific Reports, 2018, 8(1): 641-653.
- [58] Chu Lixia. Anthropogenic influence on coastal environment using satellite cloud-based platform [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. [楚丽霞. 利用遥感卫星数据云平台研究人类活动对沿海环境的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.]
- [59] Wang Jinshu. Study on the spatial characteristic of land surface temperature and the relationship between the spatial characteristic of land surface temperature and land surface characteristic in Beijing area [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008. [王今殊. 北京地区地表温度空间分布特征及其与下垫面关系研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2008.]
- [60] Dong Liangpeng. Estimation of surface air temperature from MODIS land surface temperature and its application to the study of urban heat island in the East China metropolitan area [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012. [董良鹏. 基于MODIS地表温度的气温估计方法及其在中国东部城市群热岛效应研究中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.]
- [61] Zeng Jing. Remote sensing monitoring of land use change impacts on land surface temperature [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2015. [曾静. 城市土地利用变化对地表温度影响的遥感监测[D]. 桂林: 广西师范大学, 2015.]
- [62] Cui Yongxiang. Discussion on the causes, distribution and reconstruction and utilization of unused land in Liaoning Province. China Land Science, 1998, 12(2): 12-14. [崔永祥. 辽宁省未利用土地的成因、分布及其改造利用的探讨. 中

国土科学, 1998, 12(2): 12-14.]

- [63] Xia Junshi, Du Peijun, Zhang Hairong, et al. The quantitative relationship between land surface temperature and land cover types based on remotely sensed data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 15-23. [夏俊士, 杜培军, 张海荣, 等. 基于遥感数据的城市地表温度与土地覆盖定量研究. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 15-23.]

Spatiotemporal correlation between human activity intensity and surface temperature on the north slope of Tianshan Mountains

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

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

Abstract: Research on the spatiotemporal correlation between the intensity of human activities and the temperature of earth surfaces is of great significance in many aspects, including fully understanding the causes and mechanisms of climate change, actively adapting to climate change, pursuing rational development, and protecting the ecological environment. The north slope of Tianshan Mountains, located in the arid area of northwestern China, is a typical area that is extremely sensitive to climate change. This paper takes the area as an example to retrieve the surface temperature of the mountain based on MODIS data, characterized by the effect of the intensity of human activities on the night light, population distribution and land use. The evolution characteristics of human activity intensity and surface temperature in the study area from 2000 to 2018 were analyzed, and the spatiotemporal correlation between them was further explored. It is found that: (1) The average human activity intensity (0.11) has kept relatively low since the beginning of the 21st century, and it has been slowly rising in a stepwise manner (0.0024 a^{-1}); in addition, the increase in human activity intensity has lagged behind that in construction land and population by 1-2 years. (2) The annual average surface temperature in the area is $7.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ with an obvious growth. The rate of change ($0.02 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$) is about 2.33 times that of the world. The striking boost in spring ($0.068 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$) contributes the most to the overall warming trend. Spatially, the surface temperature is low in the south and high in the north, due to the prominent influence of the underlying surface characteristics, such as elevation and vegetation coverage. (3) The intensity of human activity and the surface temperature are remarkably positively correlated in the areas with intense human activity, showing a strong distribution pattern in the east section and a weak one in the west section. The expression of its spatial differentiation and correlation is comprehensively affected by such factors as scopes of human activities, manifestations, and land-use changes. Vegetation-related human interventions, such as farming and forestry planting, urban greening, and afforestation, can effectively mitigate the surface warming caused by human activities. This study not only puts forward new ideas to finely portray the intensity of human activities, but also offers a scientific reference for regional human-land coordination and overall development.

Keywords: human activity; quantitative characteristics; night light data; population distribution; correlation analysis; north slope of Tianshan Mountains