

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.023

林之强, 彭双云, 施双富, 等. 滇中城市群地表温度时空演变及其与 LULC 的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 253-263, 272.

LIN Zhiqiang, PENG Shuangyun, SHI Shuangfu, et al. Spatio-temporal evolution of land surface temperature and its response to LULC in the urban agglomeration of central Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 253-263, 272.

滇中城市群地表温度时空演变及其与 LULC 的响应

林之强^{1,2}, 彭双云^{1,2}, 施双富^{1,2}, 黄帮梅³,
马崇玲^{1,2}, 朱紫怡^{1,2}, 马小亮⁴, 龚陆平¹

(1. 云南师范大学地理学部, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500; 3. 昆明市第十中学, 昆明 650011; 4. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650500)

摘要: [目的] 探讨滇中城市群的地表温度(LST)时空变化及其与土地利用/覆盖(LULC)类型的关系。[方法] 基于 Google Earth Engine(GEE)平台, 利用 1990—2020 年滇中城市群区域的 Landsat 卫星影像数据反演 LST, 并采用 Sen-MK 趋势分析、均值—标准差法、城市热方差指数(urban thermal field variance index, UTFVI)和相关性分析等定量分析 1990—2020 年滇中城市群的 LST 时空变化及其与 LULC 类型的响应关系。[结果] (1) 滇中城市群的年际温度等级存在显著时空差异, 中温区始终占据绝对主导地位(40%), 但其面积占比逐年下降。(2) 1990—2020 年, UTFVI < 0 的区域呈逐年增加趋势, UTFVI > 0.02 的区域呈下降趋势, 生态热环境逐渐改善。(3) 不同 LULC 类型的 LST 存在响应差异。其中, LST 与建筑用地的面积占比呈显著正相关($r > 0.70$)。1990—2020 年水域的 LST 始终最低, 多年平均温度为 17.38 °C, 而建筑用地和耕地覆盖的地区温度最高, 多年平均温度均高于 21 °C。(4) 1990—2020 年, 滇中城市群城市迅速扩张, LULC 变化显著, 建筑用地面积增长 100.29%, 城市的快速发展使 LST 升高。[结论] LULC 是影响 LST 的重要因素, 合理配置 LULC 结构, 能够改善城市群热环境。研究结果可为滇中城市群的合理开发规划及改善生态条件提供重要见解。

关键词: Google Earth Engine; Landsat; 地表温度; LULC; 响应分析; 滇中城市群

中图分类号: K903; X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)06-0253-11

Spatio-temporal Evolution of Land Surface Temperature and Its Response to LULC in the Urban Agglomeration of Central Yunnan

LIN Zhiqiang^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2}, SHI Shuangfu^{1,2}, HUANG Bangmei³,
MA Dongling^{1,2}, ZHU Ziyi^{1,2}, MA Xiaoliang⁴, GONG Luping¹

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. GIS Technology Engineering Research Centre for West China Resources and Environment of Educational Ministry, Kunming 650500, China; 3. Kunming No. 10 High School, Kunming 650011, China; 4. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatial and temporal variations of land surface temperature (LST) in central Yunnan urban agglomeration and its relationship with land use/land cover (LULC) types. [Methods] Based on Google Earth Engine (GEE) platform, LST was inverted using Landsat satellite image data of central Yunnan urban agglomeration region from 1990 to 2020, and was analyzed using Sen-MK trend analysis, mean-standard deviation method, urban thermal field variance index (UTFVI) and correlation analysis were used to quantitatively analyze the spatial and temporal variations of LST and its response to LULC types in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020. [Results] (1) There were significant

收稿日期: 2024-06-29

修回日期: 2024-08-11

录用日期: 2024-08-19

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42261073, 41971369, 41561086, 42261037); 云南中青年学术和技术带头人后备人才项目(202305AC160083, 202205AC160014); 云南省基础研究专项重点项目(202201AS070024, 202001AS070032)

第一作者: 林之强(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事生态环境与城市地理信息系统研究。E-mail: 1923130065@ynnu.edu.cn

通信作者: 彭双云(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地利用变化的生态环境效应研究。E-mail: frankmei@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

spatial and temporal differences in interannual temperature classes in central Yunnan urban agglomeration. The mesothermal area always occupied an absolutely dominant position (40%), but its area share decreased year by year. (2) From 1990 to 2020, the areas with UTFVI 0 showed an increasing trend year by year, and the areas with UTFVI > 0.02 showed a decreasing trend, and the ecological and thermal environments were gradually improved. (3) There were response differences in LST for different LULC types. Among them, LST was significantly positively correlated with the proportion of built-up area ($r > 0.70$). LST was always the lowest in the water area, with a multi-year average temperature of 17.38 °C, while the highest temperature was found in the area covered by built-up land and cropland, with multi-year average temperatures above 21 °C. (4) The rapid expansion of cities in the central Yunnan urban agglomeration had resulted in significant changes in LULC. The built-up land area had increased by more than 100.29%, and the rapid development of cities had increased LST from 1990 to 2020. [Conclusion] LULC is an important factor affecting the LST, and reasonable configuration of LULC structure can improve the thermal environment of urban agglomeration. The study's results can provide important insights for rational development planning and improvement of ecological conditions in the urban agglomeration of central Yunnan.

Keywords: Google Earth Engine; Landsat; land surface temperature; LULC; response analysis; central Yunnan urban agglomeration

Received: 2024-06-29

Revised: 2024-08-11

Accepted: 2024-08-19

Online(www.cnki.net): 2024-09-18

随着全球城市化进程的快速推进,城市热岛效应日益突出^[1],已成为全球普遍关注的环境问题之一^[2]。城市热岛效应导致城市中心区域温度显著高于周围郊区,不仅影响城市居民的生活质量和健康,还加剧城市大气污染,增加能源消耗,对区域可持续发展构成挑战^[3]。地表温度(land surface temperature, LST)是表征城市热环境的重要参数,准确获取城市 LST 的时空变化信息,对深入理解城市热岛效应的形成机制、定量评估其环境效应具有重要意义。

遥感技术以其宏观、动态监测的优势,为获取大区域、长时间序列的 LST 信息提供有效手段^[4]。20 世纪 80 年代以来,已有学者^[5]利用 NOAA/AVHRR、Terra/MODIS、Landsat 等多种卫星遥感数据开展大量的 LST 反演研究,为揭示区域地表热环境特征提供重要的数据支撑。付蓉等^[6]利用 MODIS 数据分析了合肥市 LST 的空间分异;康紫薇等^[7]基于 MODIS 数据分析新疆的 LST 时空变化特征;叶家慧等^[8]基于 GEE 定量分析了 2000—2019 年雄安新区的 LST 时空动态。其中, Landsat 系列卫星能提供长时序高空间分辨率的 LST 估计值。目前,已经提出许多用于 Landsat 系列的 LST 反演算法^[9-10]。但是,仍然存在一些问题亟待解决。首先,大多数算法需要用户提供必要的输入数据和校准系数,而这些数据和校准系数通常不容易获得;其次,虽然一些数据集可在线获得,但对用户处理大量数据的能力有较高要求。近年来,美国地质调查局联合美

国国家航空航天局共同研发的 Google Earth Engine (GEE) 云平台受到广泛关注。GEE 平台集成了海量的遥感影像数据和强大的计算处理能力,允许用户直接调用和分析平台中的遥感数据,无需下载和存储,极大地提高数据处理效率,为开展 LST 的时空变化研究提供便利条件^[8]。目前已有学者基于 GEE 平台开展 LULC 变化^[11]、城市热岛效应^[12]、林地退化^[13]等方面研究。

土地利用/土地覆被(land use/land cover, LULC)变化导致下垫面物理特性(如反照率、地表粗糙度、植被覆盖度等)的改变,进而影响地表能量收支过程,是引起区域 LST 时空变化的重要驱动因素^[14]。已有研究^[15]表明,城市扩张背景下的 LULC 变化,尤其是大规模的自然植被和农田向不透水面(如房屋建筑、道路等)转变,显著增加城市 LST,加剧城市热岛效应。城市热岛现象给城市居民的生活带来多种不利影响,包括疲劳度增加、睡眠质量下降、城市空气污染加剧等^[16]。此外,城市热岛还对城市的生态环境造成负面影响,加速土地退化并破坏生物多样性^[17]。尤其是随着城市的不断扩张,多个城市形成城市群,导致城市间热岛现象的重叠和积累,使城市群成为热岛生态环境问题的集中地^[18]。同时,不同 LULC 类型对 LST 的影响存在显著差异^[19]。例如,植被覆盖区的 LST 通常低于建筑区,水体的降温效应最为明显^[20]。然而,目前对 LULC 与 LST 的响应已有大量

研究,但城市群区域尺度内的 LST 与 LULC 关系响应关注尚显不足,城市群不同 LULC 类型对 LST 的影响程度和机制亟待探明。随着城镇化进程的加快,滇中城市群的 LULC 动态变化愈发显著,城市群热环境问题逐渐凸显,对区域的可持续发展造成重要影响。因此,定量评估滇中城市群 LULC 变化对 LST 的影响,对科学指导城市群规划、缓解城市热岛效应具有重要意义。

基于此,本文以快速城镇化地区的滇中城市群为研究区,基于 GEE 平台的 Landsat 遥感影像数据,反演研究区 1990—2020 年的 LST,分析 LST 的时空变化特征;同时结合 LULC 数据,定量探讨不同 LULC 类型对 LST 的影响差异及其时间变化规律,以期为理解滇中城市群热环境演变规律、制定区域可持续发展对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中城市群(100°43′07″—104°49′40″E,22°59′34″—27°03′19″N)包括昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部 7 县,总计 49 个县、市、区,国土面积约占云南省的 29%。地形以山地和盆地为主,平均海拔 1 848 m,相对高差悬殊,最大高差约 4 000 m(图 1)。气候属于低纬高原山地季风气候,全年温和湿润。年降水量在 900 mm 以上,平均降水日数超过 160 天,受季风影响较大,降水主要集中于 6—8 月。受气候条件影响,年平均气温约为 16 ℃,最高气温出现在 6 月,最低气温出现在 12 月,光热条件充足。然而,自 20 世纪 90 年代以来,随着全球气候变暖加剧,滇中地区极端气候频繁出现。如 2020 年的极端高温事件,2005 年、2010—2011 年和 2020 年的严重干旱。此外,快速城市化也带来诸如城市热岛效应、空气质量恶化、水资源压力和生态退化等挑战^[21],为确保滇中城市群的可持续发展,需要采取措施改善城市规划、加强气候监测、预警和应对能力,以减轻热环境问题对城市和居民的不利影响。

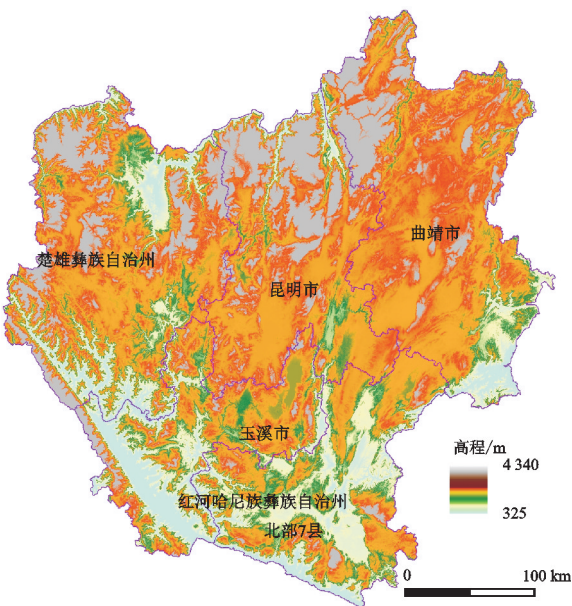


图 1 研究区地理位置
Fig.1 Geographic location of the study area

1.2 数据来源

考虑到研究范围广泛和对长时间序列的要求,使用 GEE 平台计算 LST。GEE 提供美国地质调查局(USGS)的 Landsat 全球数据集。本文使用 1990—2020 年的 Landsat-5 和 Landsat-8 影像,数据分辨率均为 30 m。LANDSAT/LT05/C01/T1_SR 数据集(表 1)用于计算 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年的 LST。该数据集包括来自 Landsat-5 ETM 传感器的大气校正地表反射率数据。影像包括 4 个可见光和近红外波段、2 个短波红外波段和 1 个热红外波段,经处理后成为正射亮度温度数据。LANDSAT/LC08/C01/T1_SR 数据集(表 1)用于计算 2010 年、2015 年和 2020 年的 LST。该数据集包括 Landsat-8 OLI/TIRS 传感器拍摄的经过大气校正的地表反射率数据。这些影像包括 5 个可见光和近红外波段和 2 个短波红外波段,经处理后成为正射校正的地表反射率数据。此外,还有 2 个热红外波段被处理为正射亮度温度数据。为消除云量对数据的影响及满足研究区覆盖范围,选取对应年份冬季的影像用于 LST 计算。

表 1 数据来源

Table 1 Introduction to the sources of the dataset			
数据集	类型	时间	数据来源
LANDSAT/LT05/C01/T1_SR	Landsat 5	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/
LANDSAT/LC08/C01/T1_SR	Landsat 8	2010 年、2015 年、2020 年	

为考察 LULC 和 LST 的响应关系,收集滇中城市群区域的 LULC 数据,数据来源于中科院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)。该数据是以 Landsat 遥感影像为数据源构建的中国长时序 LULC 数据集,空间分辨率为 30 m,数据季相为冬

季。根据土地资源及其利用属性,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地共 6 个一级类。数据精度检验包括野外调查点随机抽样核查和 Kappa 系数检验,LULC 一级类型综合评价精度达到 94.3% 以上。其中,野外核查解译精度均在 95% 以上。从

Kappa 系数检验结果看,耕地和建设用地平均分类精度达到 85%以上,林地、草地、水域等平均分类精度均在 80%以上,能够满足本次研究需求。根据研究内容,本文选用 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 7 期的 LULC 数据进行 LULC 和 LST 的响应分析。

1.3 研究方法

1.3.1 反演 LST 通过 GEE 平台利用 Landsat 数据的热红外波段计算亮度温度。Landsat 5 影像的热红外波段为第 6 波段,Landsat 8 卫星的热红外传感器具有 2 个热红外波段(10,11 波段)。在 GEE 中计算 LST 时还需要计算一些重要参数(表面发射率)。Landsat 中的红色和近红外波段还用于推导归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),该指数是根据 SR 值计算得出的(TOA 值不太准确)。NDVI 计算公式^[22]为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (1)$$

NDVI 通常用于推导植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)。FVC 计算公式^[23]为:

$$\text{FVC} = \left(\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{bare}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{bare}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中:NDVI_{bare} 和 NDVI_{veg} 分别为裸地和植被像素的 NDVI 值。

然后,使用植被覆盖方法^[24]推导任何给定时间植被区域的发射率值,计算公式为:

$$\epsilon_b = \text{FVC}_{\text{veg}} + (1 - \text{FVC}_{\text{veg}}) \epsilon_{\text{bare}} \quad (3)$$

式中:FVC_{veg} 和 FVC_{bare} 分别为给定光谱波段 b 的植被和裸露地面的发射率。植被表面的发射率通常在 TIR 区域显示出相对较小的变化。因此,该值设置为 $\epsilon_{\text{veg}} = 0.99$ ^[25]。

通过以上计算的地面亮度温度和地表比辐射率等,再将地面亮度温度转化为 LST。计算公式为:

$$\text{LST} = \frac{T_B}{1 + (\lambda \cdot T_B / \rho) / \ln \epsilon} - 273.15 \quad (4)$$

式中:LST 为地表温度,结果减去 273.15 后将单位转化为℃。

1.3.2 LST 热力等级分类 由于温度周期性变化、影像获取时间前后气象条件差异(尽管获取时间是无云的,但该影像是否受观测时间前后可能的云、雨等影响未知)等因素存在,LST 存在波动难以直观地反映变化趋势。为了增强年间、年际的可比性,需对 LST 反演结果进行归一化处理,从而更精确地分析长时间序列下滇中城市群 LST 时空变化情况。采用归一化方法将 LST 分布范围统一到 0~1,计算公式为:

$$\text{NLST}_i = \frac{\text{LST}_i - \text{LST}_{\min}}{\text{LST}_{\max} - \text{LST}_{\min}} \quad (5)$$

式中:NLST_{*i*} 为归一化后像元 i 的值;LST_{*i*} 为像元 i 的 LST 反演值;LST_{min} 和 LST_{max} 分别为图幅范围内 LST 的最小值和最大值。

平均值-标准差法^[8]以区域平均温度为基准,计算目标像元温度值对于区域平均温度的变化大小与同期温度标准差之间的相对关系,并以此为依据划分相应的温度等级区,能很好地消除不同时期的温度背景的影响,在不同时相的 LST 研究中,一定程度上可以避开不同时相的差异。通过平均值-标准差法,以 0.5 个标准差和 1 个标准差作为分割点,将归一化后的 LST 划分为 5 个级别,具体分级方法见表 2。

表 2 LST 分级标准

Table 2 LST grading criteria

LST 等级	分级标准
低温区	$T_i < T_{\text{mean}} - \text{std}$
次低温区	$T_{\text{mean}} - \text{std} \leq T_i < T_{\text{mean}} - 0.5\text{std}$
中温区	$T_{\text{mean}} - 0.5\text{std} \leq T_i < T_{\text{mean}} + 0.5\text{std}$
次高温区	$T_{\text{mean}} + 0.5\text{std} \leq T_i < T_{\text{mean}} + \text{std}$
高温区	$T_{\text{mean}} + \text{std} < T_i$

注: T_i 为像元 LST 值; T_{mean} 为研究区地表平均温度值; std 为标准差。

1.3.3 Sen 斜率-MK 趋势分析 Theil-Sen Median 方法又被称为 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法^[26]。通过此方法计算 1990—2020 年的 LST 时间序列变化趋势。Sen 斜率的计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (6)$$

式中:Median 为取中值函数; i 和 j 分别为第 i 和 j 年; x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的 LST; β 为斜率,表示此序列的平均变化率以及时间序列的趋势,当 $\beta > 0$ 时,序列呈上升趋势;当 $\beta = 0$ 时,序列趋势不明显;当 $\beta < 0$ 时,序列呈下降趋势。

M-K 检验是 Mann-Kendall 检验法,其优点是不需要测量值服从正态分布,也不要求趋势是线性的,并且不受缺失值和异常值的影响,在长时间序列数据的趋势显著性检验中得到十分广泛的应用^[26]。目前常用于长时间序列的栅格数据(如 FVC, NDVI, NPP)的显著性检验。对于序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,M-K 检验统计量 S 计算公式为:

$$\operatorname{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}+1 & x_j-x_i>0 \\ 0 & x_j-x_i=0 \\ -1 & x_j-x_i<0\end{cases}\quad(8)$$

根据样本数量的不同,显著性检验有所不同,当 $n>10$ 时,计算标准正态分布统计量 Z ,计算公式为:

$$Z=\begin{cases}S-1/\sqrt{\operatorname{Var}(S)} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ S+1/\sqrt{\operatorname{Var}(S)} & S<0\end{cases}\quad(9)$$

$\operatorname{Var}(S)$ 计算公式为:

$$\operatorname{Var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18\quad(10)$$

在趋势检验中,输入置信度水平 α ,若 $|Z|\geq Z_{1-\alpha/2}$,原假设不成立,即在置信度水平 α 上,时间序列数据增加或较大幅度较为明显。当 $Z>0$ 时,表示上升趋势,当 $Z<0$ 时,表示下降趋势。本文置信度水平 α 取 0.05。

1.3.4 城市热场方差指数 城市热场方差指数(urban thermal field variance index,UTFVI)是城市环境生态评价中最常用的指标。为了评估 LST 对城市居民健康的影响,使用 UTFVI 评估城市群的热环境状态^[27]。其表达式为:

$$\operatorname{UTFVI}=1-\frac{\operatorname{LST}_{\text{mean}}}{\operatorname{LST}_{\text{pixel}}}\quad(11)$$

式中: $\operatorname{LST}_{\text{pixel}}$ 为像素点的 LST($^{\circ}\text{C}$); $\operatorname{LST}_{\text{mean}}$ 为目标区域的平均 LST。将其分为 6 类,分别代表 6 种不同的具体城市热岛指数和生态评价指数情景(表 3)。

表 3 UTFVI 和生态评价指数的阈值
Table 3 Thresholds for UTFVI and ecological evaluation index

UTFVI	城市热岛现象	生态评价指标
<0	无	很好
$0\sim0.005$	弱	好
$0.005\sim0.010$	中等	正常
$0.010\sim0.015$	强	差
$0.015\sim0.020$	较强	较差
>0.020	极强	极差

1.3.5 响应分析 相关性分析是研究不同变量之间相互关系,从而衡量 2 个因素的相关密切程度的一种分析方法。相关性分析经常被用来量化 LST 与 LULC 组分之间的关系^[28]。Kendall 相关系数用于反映分类变量相关性的指标,适用于 2 个分类变量均为有序分类的情况。对相关的有序变量进行非参数相关检验,取值为 $-1\sim1$ 。Spearman 相关系数用于衡量 2 个变量之间的单调关系,不要求变量呈线性关系,对于等级或顺序数据更为适用。因此,研究中使用 Kendall 和 Spearman 评估 LULC 面积占比与平均 LST 之间的定量关系,以此来评估 LULC 结构对 LST 的影响。此外,研究还通过叠加分析和统计分

析计算各 LULC 类型的平均 LST。

2 结果与分析

2.1 滇中城市群 LST 时空变化

2.1.1 LST 等级结构时空特征 由图 2 可知,整体来看,LST 在滇中的空间分布大致相同,LST 较高值多集中在红河、楚雄及东川河谷地区。1990—2020 年滇中城市热环境呈大面积增温趋势。可能是由全球气候变暖、城市化加速等因素推动的。对滇中城市群区域 1990—2020 年的 7 期 LST 结果进行平均值统计(图 3),1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的 LST 平均值分别为 17.91,19.93,18.15,22.42,20.59,21.38,21.75 $^{\circ}\text{C}$,在整个研究期间总体呈上升趋势。2005 年出现峰值,究其原因,2005 年云南省发生严重干旱,持续高温天气导致研究区 LST 出现峰值。

由图 4、图 5 可知,1990—2020 年,滇中城市群呈现以中温区为绝对主导,低温区、次低温区、次高温区 and 高温区均等复合的 LST 等级结构特征。中温区始终占主导地位,使得滇中城市群难以出现极端气候,城市大气环境趋于温和。随着时间的推移,中温区的比例大致呈逐年下降趋势,表明极端天气易发性在增加。从不同时期来看,2010 年高温区比例最大,而 1990 年最小,二者相差 5.6%。结合同时期的 LULC 情况来看,1990 年绿地覆盖率达到研究期最高值,并且该年气温较低。而 2010 年云南滇中城市群大旱,植被长势较差,LST 明显上升。尤其是红河州境内,受干旱影响最甚。2000—2010 年低温区和次低温区的面积比例有所下降,高温区和次高温区呈上升趋势。原因是 2005—2010 年,随着社会进程的加快,滇中城市群城市开始呈扩张趋势,导致城市用地增多,低温区域逐渐转化为高温区域。这一时期内滇中地区发生 50 年一遇的极端干旱也导致高温区域的增加。政府在大力发展经济的同时,也不断地对城市结构进行优化调整,通过合理的城市规划和加大绿化等措施使近年来的高温区呈下降趋势。

从空间分布来看,高温区集中于楚雄元谋县、昆明东川区、红河州元江县、蒙自市、开远市等地,主要为金沙江流域和元江—红河流域的干热河谷地区。受退耕还林政策推动下植被覆盖率大幅提升的影响,2005 年后的低温区逐年增加,2005 年前呈下降趋势。尽管整个研究区年平均温度不断升高,但高温区在近 10 年却呈下降趋势。尤其是 2010 年后红河州区域的高温区逐渐减少。是因为在城市发展的后期,人们更加注重绿色、健康舒适的城市生活环境,高温区不断被治理或改造,从而有效改善城市热环境。在未来

的十几年内,滇中城市群整体仍将表现为以中温区为主,其余温区均匀分布的格局。

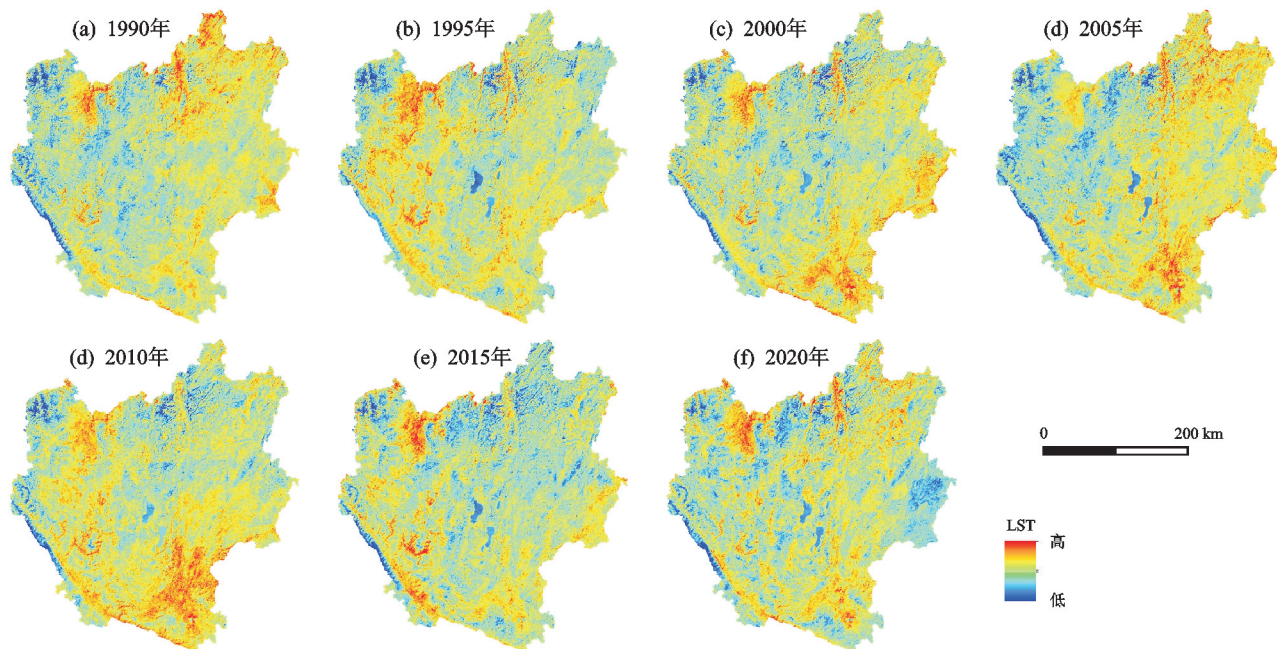


图 2 滇中城市群 LST 反演

Fig.2 LST inversion for central Yunnan urban agglomeration

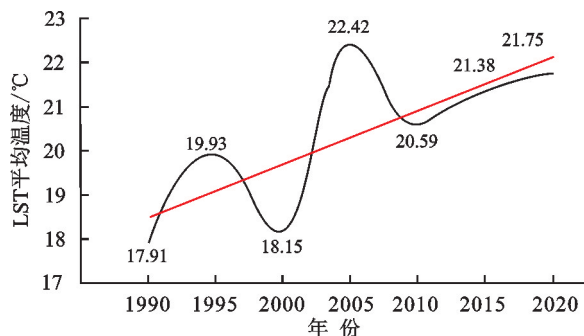


图 3 1990—2020 年 LST 平均温度变化

Fig.3 Curve of change in mean LST

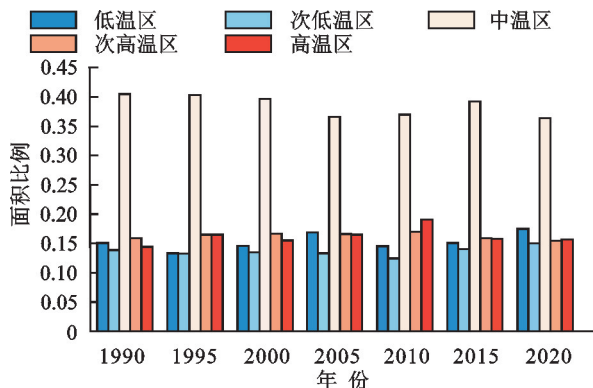


图 4 滇中城市群 LST 不同温区的面积占比

Fig.4 Area share of different temperature zones of LST in central Yunnan urban agglomeration

2.1.2 LST 年际变化趋势特征 由图 6 可知, 1990—2020 年滇中城市群 LST 呈减弱趋势, 城市建筑区域呈明显上升和轻微上升的趋势。整体而言, 滇中城市群区域在 1990—2020 年显示出积极的趋势。从整个区域来看, 滇中城市群的东北区域热环境显示

出较为积极的趋势, LST 明显降低, 但滇中城市群的西部和南部区域 LST 逐渐增加, 表明热环境在逐年变差。昆明市和曲靖市响应生态文明建设, 加大了绿化工程的力度, 如植树造林、城市绿化等。滇中西部和南部正加快城市建设, 导致 LST 的增高。其中, 昆明主城区呈明显上升的趋势, LST 显著上升, 形成城市热岛。这是滇中城市群人口相对集中、城市化发展最快的区域, 城市建筑面积的快速增加导致热环境变差。因此, 未来的城市规划应该考虑城市绿地降温。

2.1.3 UTFVI 估计与生态评价 由图 7 可知, 无 UTFVI 区呈逐年增加趋势, 最强 UTFVI 区呈下降趋势。结果表明, 建成区的增加将导致周围最强 UTFVI 区的减少。值得注意的是, 滇中城市群的生态指标是比较差的, 尽管极差的区域在逐年下降, 但城市群整体生态质量仍然偏低, 表明滇中生态热环境亟需改善。从城市群整体视角来看, 红河 7 个州市的生态环境质量尤为不佳, 可能是由于过去的几十年间, 快速城市化、工业化和矿产资源开发等导致热排放的显著增加。红河 7 县纬度较低, 多是河谷区域, 植被覆盖度不高, 水土流失地表裸露, 导致增温较快, 难以逸散。在未来几年, LST 高温区将导致最强 UTFVI 区占据主导地位。在不久的将来, 为减少热环境变差并使城市生态可持续发展, 应当在一些河谷两侧的山坡上植树造林, 增加植被覆盖, 改善局地小气候, 并且加强水土保持工作, 防止水土流失, 保护河谷地区的生态环境。

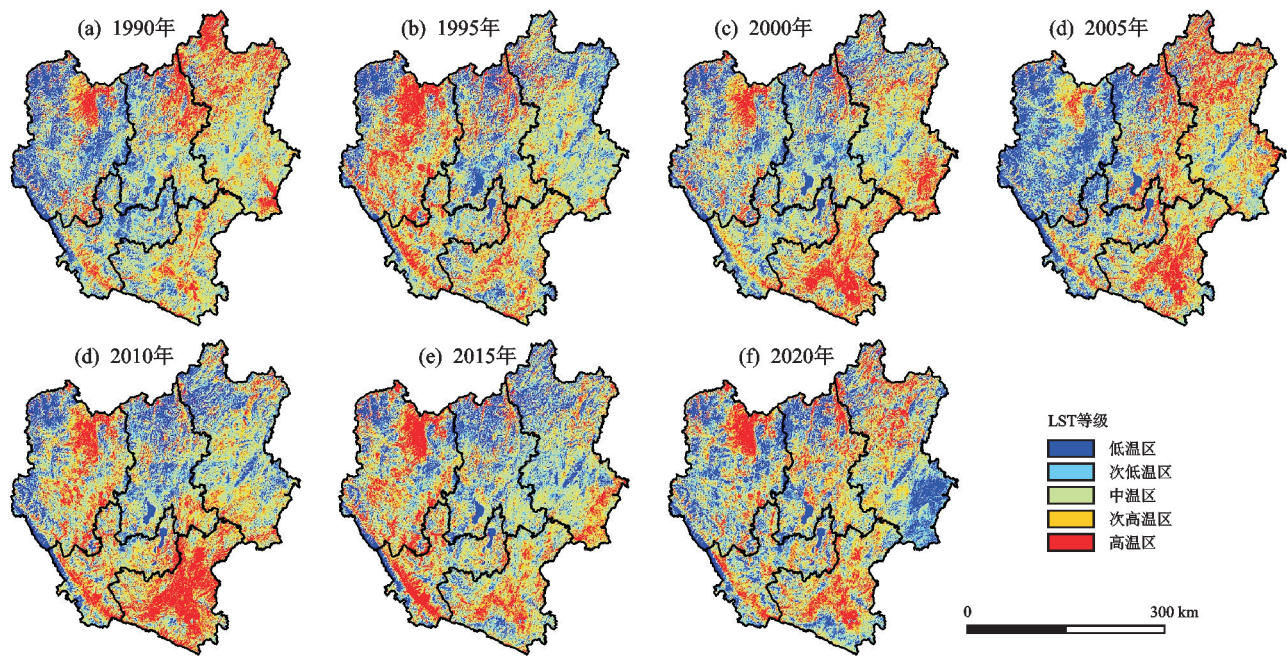


图 5 1990—2020 年 LST 等级分区
Fig.5 LST zoning classification map from 1990 to 2020

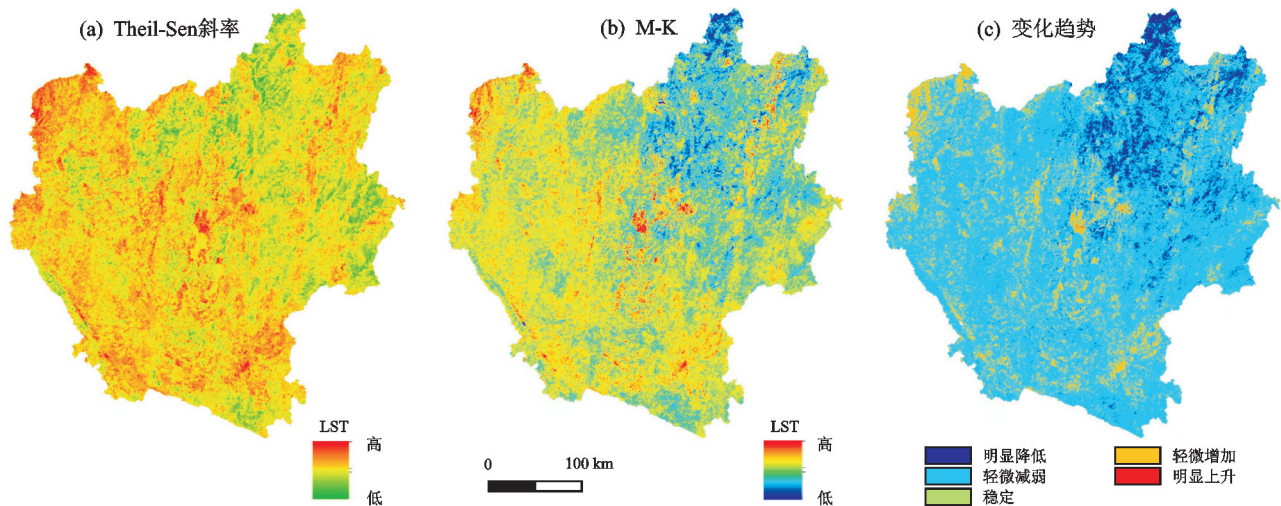


图 6 1990—2020 年 LST 趋势
Fig.6 The trend of LST changes from 1990 to 2020

2.2 滇中城市群 LULC 时空变化特征

由图 8 可知,整体上滇中城市群 LULC 类型以林地和草地为主。1990—2020 年,空间上最明显的变化为建设用地。2000 年以来,建设用地飞速增长,以滇中主要城市为中心,逐渐向四周扩展,空间变化明显。

1990—2000 年,滇中城市群各 LULC 类型的面积由大到小依次为林地、草地、耕地、水域、建设用地、未利用土地。2000 年以后,各 LULC 类型面积由大到小依次为林地、草地、耕地、建设用地、水域、未利用土地。1990—2020 年,面积最大的林地占 49% 以上,整体土地利用结构趋于稳定(表 4)。2005 年,建设用地快速增加首次超过水域面积,表明 21 世纪开始,滇中城市群的社会经济快速发展,城市进入快速增长阶段。至 2020 年,林地、草地、耕地、建设用地、水域、未利用土地

的面积分别占总面积的 49.09%, 26.84%, 20.23%, 2.39%, 1.31%, 0.14%。1990—2020 年,耕地、林地、草地和水域分别占总面积的 98.85%, 98.66%, 98.71%, 98.63%, 98.31%, 98.18%, 97.47%, 说明滇中的自然地表在 LULC 类型中占主导地位,构成农林复合的土地利用结构特征。其中,建设用地的面积变化幅度最大,建设用地从 1990 年的 1 129.67 km² 增长至 2020 年的 2 662.61 km², 增加 100.29%。可见,由于滇中城市群社会经济发展和人类活动增强,城市建设在 30 年内扩张迅速。同时,建筑用地快速扩张,也将导致城市“热斑”区域出现。总体来看,除水域和建设用地外,其他 LULC 类型均呈不断减少的变化态势。自然地表不断减少,建设用地的活跃变化,表明人类活动对 LULC 变化的影响越来越大。

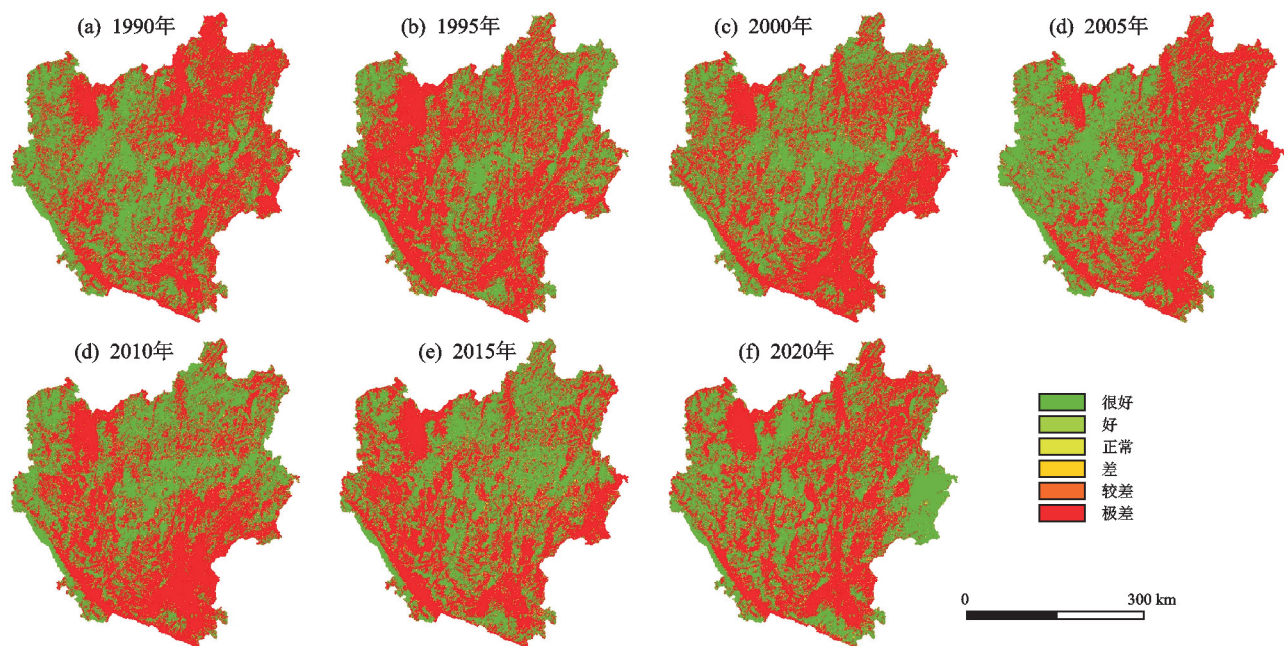


图 7 1990—2020 年 UTFVI 估计和生态评价

Fig.7 UTFVI estimates and ecological evaluations from 1990 to 2020

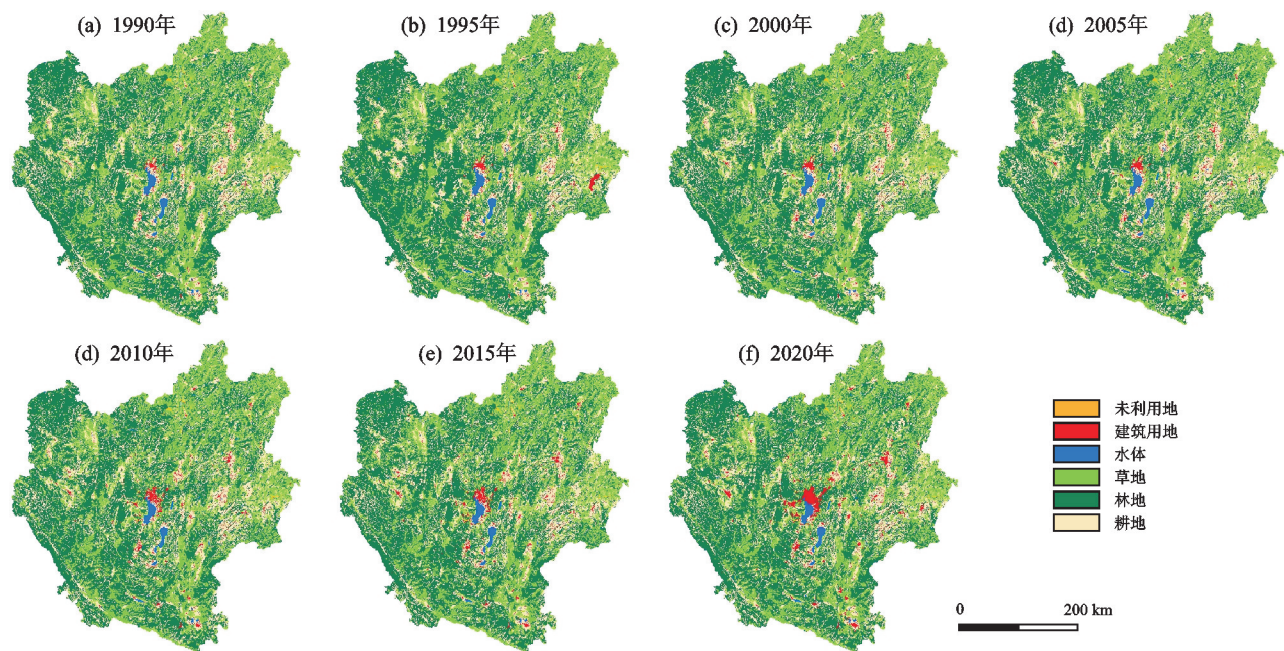


图 8 1990—2020 年滇中城市群的 LULC 变化

Fig.8 Changes in LULC of urban agglomeration in central Yunnan from 1990 to 2020

2.3 滇中城市群 LST 与不同 LULC 类型的响应

不同 LULC 类型与 LST 之间存在响应差异。将 1990—2020 年 LULC 类型面积占比与对应年份的研究区平均温度进行 Kendall、Spearman 相关性分析。结果表明,在 95% 的置信区间下 LST 与建筑用地面积占比显著相关,相关性分别为 0.71 和 0.79。其他 LULC 类型与 LST 之间的相关性则是很弱,相关性基本以耕地>建筑用地>草地>林地>水域的形式呈现。表明下垫面中,耕地和建筑导致 LST 偏高,而水域和植被则是具有降温作用。为考察二者的

对应关系,基于 ArcGIS 10.8 软件叠加分析,分区统计不同地物类型的平均 LST(表 5)。结果表明,不同年份水体对应的 LST 始终最低,多年平均温度为 17.38 °C,建筑用地、耕地的地温最高,多年平均温度都超过 21 °C。在研究期内,因为冬季影响质量较好,GEE 筛选的影像大多集中于冬季,多数耕地和草地因休耕、休牧而与裸地情况类似,偶有 LST 略高于建筑用地 0.23~1.23 °C 的情况。将 LST 与 LULC 变化图叠加分析,温度增高区与城市扩张区一致性很高,说明城市 LULC 变化引起城市 LST 的升高。

表 4 1990—2020 年 LULC 类型面积占比
Table 4 Area share of LULC types from 1990 to 2020

年份	指标	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990	面积/km ²	23 459.02	54 769.87	30 633.79	1 283.28	1 129.67	155.76
	比例/%	21.05	49.15	27.49	1.15	1.01	0.14
1995	面积/km ²	21 075.82	56 741.97	30 860.72	1 262.66	1 321.4	168.82
	比例/%	18.91	50.92	27.69	1.13	1.19	0.15
2000	面积/km ²	23 057.69	54 995.16	30 641.90	1 295.78	1 285.10	155.75
	比例/%	20.69	49.35	27.50	1.16	1.15	0.14
2005	面积/km ²	22 971.38	54 987.93	30 649.29	1 290.79	1 376.10	155.91
	比例/%	20.61	49.35	27.51	1.16	1.23	0.14
2010	面积/km ²	22 979.54	54 901.77	30 342.97	1 328.35	1 717.15	161.62
	比例/%	20.62	49.27	27.23	1.19	1.54	0.15
2015	面积/km ²	22 910.44	54 886.98	30 328.54	1 279.14	1 864.58	161.72
	比例/%	20.56	49.26	27.22	1.15	1.67	0.15
2020	面积/km ²	22 540.53	54 696.26	29 908.99	1 462.36	2 662.61	160.65
	比例/%	20.23	49.09	26.84	1.31	2.39	0.14

值得注意的是,2005 年,耕地、林地和草地的 LST 平均值均最高,其原因是 2005 年滇中区域高温少雨,且影像获取为冬季,农作物已收耕,植被缺水长势不好,导致林地、草地不再呈片状分布,郁闭度不足,因此太阳辐射可以穿过森林冠层直射地表使其下方温度升高,且毗邻耕地的林地接收到来自耕地的热辐射、反射等,LST 较其他年份有明显增高。然而,2010—2020 年,耕地、林地和草地的 LST 平均值逐年上升,其主要原因是耕地、林地和草地的面积在大幅减少。其中,部分耕地则是由于城市化的进程被人为弃耕,逐渐形成类似于裸地的地表。近些年,受国家“退耕还林(草)”“植树造林”等绿色发展理念实行的影响,林地、草地面积有所稳定,生态环境有所改善。

表 5 不同 LULC 类型的平均 LST
Table 5 Mean LST for different LULC types ℃

LULC	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	19.44	20.89	19.32	23.73	22.21	22.75	23.32
林地	16.62	19.12	17.05	20.96	19.36	20.35	20.54
草地	18.97	20.82	19.26	24.12	21.60	22.22	22.70
水域	16.15	16.20	15.32	18.52	17.73	18.51	19.21
建筑用地	18.40	19.59	18.61	23.75	21.61	22.52	23.81
未利用地	19.12	20.20	18.64	22.66	19.08	21.28	22.86

3 讨论

3.1 基于 GEE 和 Landsat 反演城市群 LST

城市群空间结构的复杂性对 LST 的估算带来挑战,利用遥感定量估算 LST 需要考虑一定范围内地形、LULC 类型、植被覆盖和人类活动因素。利用 GEE 获取大规模和长时间序列的 LST 数据,促进对

过去 20 年滇中城市群热环境状况变化的监测。然而,研究方法仍有改进的潜力。首先,研究用到的 Landsat 系列影像虽然是反演 LST 的较高分辨率的数据,但是影像的获取受到天气、传感器限制等多种因素的影响,在较大区域开展研究的时候,还是有一定的数据质量影响,甚至可能影响反演结果。在今后的研究中,可以考虑与多种遥感影像相互补充,以构建更全面、更合适的反演评估模型。其次,为获得较为完整的 LST,影像的时间范围较大,获取整年的影像进行平均值计算,结果可能存在一定误差。L

通过计算数据的中位数来确定时间序列的趋势,大大减轻这种随机误差的影响,增强研究的科学有效性。事实证明,通过此检验方法从某种程度上来说是能够较好地分析长时间序列上的 LST 变化。

本研究发现,滇中城市群生态热环境逐渐改善。可能与政策推动与退耕还林(草)政策等生态保护措施、生态修复项目、自然调节及城市规划与建设有关。国家长期实施的退耕还林(草)政策有助于增加植被覆盖,改善地表反照率和热辐射特性,从而降低 LST。滇中城市群实施多个生态修复项目,如湿地保护、河流治理、城市绿化等,这些项目对改善区域生态热环境起到积极作用。部分区域在减少人为干扰后,自然生态系统逐渐恢复,植被生长茂盛,有助于降低 LST。昆明、玉溪、曲靖等城市在城市化进程中注重绿色城市建设,通过增加城市绿地、建设生态廊道等措施来改善城市热环境。推广建筑节能技术和减少温室气体排放也有助于降低城市热岛效应,改善生态热环境。但是,城市与城市之间存在一定的差异。昆明作为滇中城市群最大城市,经济发展水平相对较高,产业结构更加多元化,对生态环境的保护力度也更大。而玉溪、曲靖等城市在经济发展过程中面临不同的挑战和机遇,对生态环境的重视程度和保护力度也存在差异。昆明、玉溪、曲靖等城市在自然条件(如地形、气候、水资源等)和地理位置上存在差异,这些差异导致它们在生态热环境改善方面面临不同的挑战和机遇。不同城市在政策执行和监管力度上也存在差异,也影响生态热环境的改善效果。

本研究发现的温度变化趋势与滇中城市群区域内已有研究^[23]的结果一致。滇中城市群经历快速城市化进程,人类活动和自然演化改造 LULC,越来越多的人造地表侵占自然地表。已有研究^[30]表明,LULC 的这种变化趋势极大地改变 LST 的分布情景。本研究中通过相关性分析表明,LST 与建筑用地面积占比显著相关,证实 LULC 变化能够改变 LST。值得注意的是,对于滇中城市群区域而言,所有这些转变背后的主要原因之一是人口在一段时间内的爆炸性增长,特别是在过去 30 年中,其人口增长 800 多万,对土地的大量需求用于住房、医疗保健、教育、娱乐活动、停车场、道路等。由于各地建设用地的快速发展,降低热环境的自然地表(林地、草地)持续减少,如果不尽早遏制,城市群热环境问题将愈发严重。

3.3 城市群热环境缓解对策分析

根据本文的研究结果,对于未来滇中城市群生态保护建设给出 3 点建议:(1)精准实施农田与林草生

态修复工程。基于 LST 与 LULC 的关联分析,优先在 LST 较高的耕地(尤其是城市化进程中被边缘化的农田)区域实施退耕还林、退耕还草计划,同时采用耐旱作物种植技术减少农业用水需求。在昆明市、曲靖市、楚雄市、红河州城市边缘等热岛效应显著区域,建设生态隔离带和生态廊道,选用具有高效降温作用的植物种类,有效降低周边温度。(2)优化 LULC 布局,强化生态缓冲区建设。精准识别并减少城市“热斑”区域(即昆明市区、元谋河谷、元阳河谷等)的进一步扩张,合理规划城市群绿地系统,特别是增加城市公园、社区绿地等绿色空间,作为城市“冷岛”。在高速公路两侧和大型工业区周边设置足够的生态缓冲区,通过植被覆盖减少热量向城市中心的传导,严格控制河谷地区作物种植与林草恢复的平衡,重视土地利用转型问题。(3)提高城市群城市蓝绿空间,稳定并合理增加城市绿地面积,提高城市人均绿化面积占有量,增加市区内人工水体面积,恢复和保护水库、湖泊的周边生态环境。

4 结论

(1)基于 GEE 和 Landsat 影像反演城市群区域尺度的 LST 具有一定的可行性。

(2)滇中城市群年际温度等级空间分布具有差异性。滇中城市群呈现出以中温区为绝对主导(40%),低温区、次低温区、次高温区和高温区均等复合的 LST 等级结构特征。中温区面积占比逐年下降,合理规划各温区对于城市群建设至关重要。

(3)1990—2020 年,无 UTFVI 区呈逐年增加的趋势,最强 UTFVI 区呈下降趋势。滇中整体生态环境较差,但总体逐渐转好。

(4)不同 LULC 类型的 LST 存在响应差异,基本以耕地>建筑用地>草地>林地>水域的形式呈现。其中,LST 与建筑用地的面积占比呈显著相关。1990—2020 年水域对应的 LST 始终最低,多年平均温度为 17.38℃,建筑用地、耕地所覆盖的地温最高,多年平均温度都超过 21℃。2010—2020 年,耕地、林地和草地的 LST 平均值逐年上升,其主要原因是耕地、林地和草地的面积在大幅减少。

(5)1990—2020 年,滇中城市群城市迅速扩张,LULC 变化显著,建筑用地面积增加 100.29%,城市的快速发展使 LST 提高。LUCC 是影响 LST 的重要因素,合理配置 LULC 结构,能够改善城市群热环境。

研究揭示建筑用地面积扩张与 LST 升高之间的正相关关系,可以用于预测未来城市扩展可能带来的热岛

效应风险,从而为提前制定防范措施提供数据支持。本研究的方法和结果不仅适用于滇中城市群,还可以推广到其他快速城市化的地区。通过进一步的研究,可以建立更加精确的模型,预测不同土地利用情景下的 LST 变化,为城市可持续发展规划提供科学依据。

参考文献:

- [1] 周玄德,郭华东,孜比布拉·司马义.城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响:以乌鲁木齐市为例[J].生态学报,2018,38(20):7336-7347.
ZHOU X D, GUO H D, ZIBIBULA · S M Y. Spatial pattern evolution of impervious surfaces and its influence on surface temperature in the process of urban expansion: A case study of Urumqi[J].Acta Ecologica Sinica, 2018,38(20):7336-7347.
- [2] LI K N, CHEN Y H, GAO S J. Uncertainty of city-based urban heat island intensity across 1112 global cities:Background reference and cloud coverage[J].Remote Sensing of Environment,2022,271:e112898.
- [3] ZHAO L, LEE X H, SMITH R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J].Nature,2014,511(7508):216-219.
- [4] ZHANG J, YANG G J, YANG L P, et al. Dynamic monitoring of environmental quality in the Loess Plateau from 2000 to 2020 using the google earth engine platform and the remote sensing ecological index[J].Remote Sensing,2022,14(20):e5094.
- [5] 段四波,茹晨,李召良,等.Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展 [J].遥感学报,2021,25(8):1591-1617.
DUAN S B, RU C, LI Z L, et al. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data[J].National Remote Sensing Bulletin,2021,25(8):1591-1617.
- [6] 付蓉,武新梅,陈斌.城市地表温度空间分异及驱动因子差异性分析:以合肥市为例[J].生态环境学报,2023,32(1):110-122.
FU R, WU X M, CHEN B. Analysis on the spatial stratified heterogeneity and driving factors differences of the urban land surface temperature: A case study of Hefei[J].Ecology and Environmental Sciences,2023,32(1):110-122.
- [7] 康紫薇,张正勇,刘琳,等.基于 MODIS 的新疆地表温度时空变化特征分析[J].地理研究,2022,41(4):997-1017.
KANG Z W, ZHANG Z Y, LIU L, et al. Spatio-temporal variation characteristics of land surface temperature in Xinjiang based on MODIS[J].Geographical Research,2022,41(4):997-1017.
- [8] 叶家慧,韩永伟.2000—2019 年雄安新区地表温度时空动态分析[J].环境生态学,2023,5(2):5-12.
YE J H, HAN Y W. Spatiotemporal dynamic analysis of surface temperature in Xiongan New Area from 2000 to 2019[J].Environmental Ecology,2023,5(2):5-12.
- [9] 丁银平,刘志林,角媛梅,等.哈尼梯田对厄尔尼诺极端干旱事件的响应及其机制分析[J].水土保持学报,2021,35(5):161-171.
DING Y P, LIU Z L, JIAO Y M, et al. Response and its mechanism of Hani Terraces to El Nino extreme drought events[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(5):161-171.
- [10] ERMIDA S L, SOARES P, MANTAS V, et al. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series[J].Remote Sensing,2020,12(9):e1471.
- [11] XIE S, LIU L Y, ZHANG X, et al. Automatic land-cover mapping using landsat time-series data based on Google Earth Engine[J].Remote Sensing,2019,11(24):e3023.
- [12] WANG M G, LU H M, CHEN B J, et al. Fine-scale analysis of the long-term urban thermal environment in Shanghai using Google Earth Engine[J].Remote Sensing,2023,15(15):e3732.
- [13] CHEN S J, WOODCOCK C E, BULLOCK E L, et al. Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis [J]. Remote Sensing of Environment,2021,265:e112648.
- [14] 曹畅,李旭辉,张弥,等.中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J].环境科学,2017,38(10):3987-3997.
CAO C, LI X H, ZHANG M, et al. Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China [J].Environmental Science,2017,38(10):3987-3997.
- [15] YANG C B, YAN F Q, ZHANG S W. Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city[J].Journal of Environmental Management,2020,265:e110563.
- [16] SANDIFER P A, SUTTON-GRIER A E, WARD B P. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation [J]. Ecosystem Services,2015,12:1-15.
- [17] MURTAZA K O, SHAFI S, SHAHID P, et al. Understanding the linkages between spatio-temporal urban land system changes and land surface temperature in Srinagar City,India,using image archives from Google Earth Engine [J].Environmental Science and Pollution Research International,2023,30(49):107281-107295.

- 微生物碳利用效率差异性及其影响因素[J].植物生态学报,2023,47(2):275-288.
- ZHANG Y, CHEN L, WANG J Y, et al. Differences and influencing factors of microbial carbon use efficiency in forest rhizosphere soils at different altitudes in Taibai Mountain, China[J].Chinese Journal of Plant Ecology, 2023,47(2):275-288.
- [30] 王强,耿增超,许晨阳,等.施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J].环境科学, 2020,41(5):2425-2433.
- WANG Q, GENG Z C, XU C Y, et al. Effects of bio-char application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou soil[J].Environmental Science,2020,41(5):2425-2433.
- [31] SOARES M, ROUSK J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry[J].Soil Biology and Biochemistry,2019,131:195-205.
- (上接第 263 页)
- [18] DU H Y, ZHOU F Q, LI C L, et al. Analysis of the impact of land use on spatiotemporal patterns of surface urban heat island in rapid urbanization, a case study of Shanghai, China[J].Sustainability,2020,12(3):e1171.
- [19] 徐宏超,李春林,王昊,等.土地利用变化对京津冀热环境时空演变的影响[J].中国环境科学,2023,43(3):1340-1348.
- XU H C, LI C L, WANG H, et al. Impact of land use change on the spatiotemporal evolution of the regional thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J].China Environmental Science,2023,43(3):1340-1348.
- [20] SUN R H, CHEN L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands:Mitigation and diversification[J].Ecosystem Services,2017,23:38-46.
- [21] CHEN J O, QIU Y B, YANG R, et al. The characteristics of spatial-temporal distribution and cluster of tuberculosis in Yunnan Province, China, 2005—2018 [J]. BMC Public Health,2019,19(1):e1715.
- [22] 李喆,陈圣宾,陈芝阳.地表温度与土地利用类型间的空间尺度依赖性:以成都为例[J].生态环境学报,2022,31(5):999-1007.
- LI Z, CHEN S B, CHEN Z Y. Spatial scale dependence between land surface temperature and land use types: A case study of Chengdu City[J].Ecology and Environmental Sciences,2022,31(5):999-1007.
- [23] FANG Q P, LIU C, REN Z B, et al. Spatiotemporal analysis of surface urban heat island dynamics in central Yunnan City cluster[J].Sustainability,2024,16(11):e4819.
- [24] CASELLES V, VALOR E, COLL C, et al. Thermal band selection for the PRISM instrument; 1. Analysis of emissivity-temperature separation algorithms[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,1997,102(D10):11145-11164.
- [25] PERES L F, DACAMARA C C. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2005, 43(8):1834-1844.
- [26] PANWAR M, AGARWAL A, DEVADAS V. Analyzing land surface temperature trends using non-parametric approach: A case of Delhi, India[J].Urban Climate, 2018,24:19-25.
- [27] MOHAMMAD P, GOSWAMI A, CHAUHAN S, et al. Machine learning algorithm based prediction of land use land cover and land surface temperature changes to characterize the surface urban heat island phenomena over Ahmedabad city,India[J].Urban Climate,2022,42:e101116.
- [28] SARIF M O, RIMAL B, STORK N E. Assessment of changes in land use/land cover and land surface temperatures and their impact on surface urban heat island phenomena in the Kathmandu Valley (1988—2018) [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,2020,9(12):e726.
- [29] XIANG Y F, ZHENG B H, BEDRA K B, et al. Spatial and seasonal differences between near surface air temperature and land surface temperature for urban heat island effect assessment[J].Urban Climate,2023,52:e101745.
- [30] BAPPA S A, MALAKER T, MIA M R, et al. Spatio-temporal variation of land use and land cover changes and their impact on land surface temperature; A case of Kutupalong Refugee Camp, Bangladesh [J]. Heliyon, 2022,8(9):e10449.