

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.02.014

娜扎开提·阿不都米吉提, 杨涵. 2000—2021 年乌鲁木齐河流域地表温度的时空变化特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 139-149.

2000—2021 年乌鲁木齐河流域地表温度的 时空变化特征分析

娜扎开提·阿不都米吉提, 杨涵

- 新疆师范大学 地理与科学旅游学院, 乌鲁木齐 830054;
- 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054

摘要: 地表温度是影响生态变化的重要因素之一, 地表温度可间接监测所在区域的生态环境状况. 选取 Landsat TM/OIL 遥感影像为数据源, 使用单窗算法定量反演 2000, 2005, 2010, 2015, 2021 年 5 期乌鲁木齐河流域地表温度, 采用重心转移模型分析地表温度的空间转移特征, 并结合土地利用数据分析不同土地利用类型的地表温度时空差异. 结果表明: ① 2000—2021 年, 乌鲁木齐河流域地表温度(Land Surface Temperature, LST)整体升高显著, 22 年间 LST 平均上升速率为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$, 在空间格局上, 整个流域 LST 空间分布差异较大, 温度主要以极高温、高温为主, 其中, 2021 年高温区面积占流域面积的 46%; ② 2000—2021 年各温区重心分布具有明显的方向性转移, 各温区重心迁移轨迹明显向中游靠拢, 建设用地面积的增多是流域地表温度变化的主要因素; ③ 2000—2021 年研究区地表热环境贡献从大到小依次为: 草地、林地、水体、耕地、未利用地、建设用地, 只有建设用地为正贡献.

关键词: 地表温度反演; 贡献度指数; 重心转移模型

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)02-0139-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of the Spatial and Temporal Variation Characteristics of Surface Temperature in the Urumqi River Basin from 2000 to 2021

NAZAKAT Mijiti¹, YANG Han²

1. Institute of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China

Abstract: Land surface temperature (LST) is one of the important factors affecting ecological change. LST can indirectly monitor the ecological environment in the region. In this paper, Landsat TM/OIL remote

收稿日期: 2023-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061007, 42261058).

作者简介: 娜扎开提·阿不都米吉提, 硕士研究生, 主要从事绿洲资源环境遥感分析研究.

通信作者: 杨涵, 博士, 副教授, 硕士研究生导师.

sensing images were selected as data sources, and the single-window algorithm was used to quantitatively retrieve the land surface temperature (LST) of the Urumqi River basin in the five periods of 2000, 2005, 2010, 2015 and 2021. The gravity shift model was used to analyze the spatial transfer characteristics of LST. Combined with land use data, the spatiotemporal differences of land surface temperature in different land use types were analyzed. The results show as follows: ① LST increases significantly in the Urumqi River basin from 2000 to 2021, and the average LST increase rate in 22 years is $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$. In terms of spatial pattern, the spatial distribution of LST varies greatly in the whole basin, and the temperature is mainly extremely high and high temperature. In 2021, the area of high temperature area accounts for 46% of the basin area. ② From 2000 to 2021, the distribution of the center of gravity in each temperature region has obvious transfer direction, and the center of gravity migration trajectory in each temperature region is obviously close to the middle reaches. The increase of building land area is the main factor for the change of surface temperature in the basin. ③ From 2000 to 2021, the contribution of surface thermal environment in the study area was grassland, forest land, water body, cultivated land, unused land and construction land, and only construction land made a positive contribution.

Key words: land surface temperature inversion; contribution index; center of gravity shift model

地表温度(Land Surface Temperature, LST)可以作为地气相互作用的有效指标,是影响区域生态变化的重要因素之一^[1],地表温度的变化是地表能量交换的基础^[2],研究地表温度及其变化,可间接监测全球气候变化背景下流域生态环境、城市热环境及地表辐射平衡能量等状况^[3].流域具有承载绿洲的作用,是干旱区人类活动最频繁的场所.自改革开放以来,随着西部大开发城市化、工业化的高速发展,建筑用地增加,人为改造大面积的下垫面等活动,造成了空气污染严重、城市污染加剧等一系列生态环境问题,威胁着流域居民的健康^[4].定量反演城市所在流域热环境状况,分析其时空变化特征,可间接监测所在流域的生态环境状况,对流域内城市未来发展规划和生态环境保护具有重要意义.

近年来,遥感卫星数据因具有覆盖范围广、时间同步性、空间分辨率高和成像快等优点^[5-8],被广泛应用于地表温度的动态监测中.学者们基于 MODIS 等卫星遥感地表温度产品数据,在太湖流域^[9]、石羊河流域^[10]、博斯腾湖流域^[11]等流域尺度探讨了流域的地表温度时空变化特征及不同土地利用/覆被类型对地表温度的影响,进而对流域生态环境展开监测.然而,在面积较小的流域,MODIS 数据的空间分辨率难以满足,相比较中分辨率遥感影像,在小流域尺度选取 Landsat 系列中高分辨率卫星影像可降低数据空间分辨率带来的误差.Landsat 卫星可实现持续地长期观测且容易获取,利用 Landsat 数据反演 LST 的相关研究已得到广泛应用.具体算法有:大气校正法^[12]、单窗算法^[13]、单通算法^[14]、劈窗算法^[15]等;学者们在北京、白沙灌区、齐齐哈尔市辖区、疏勒河上游流域等区域基于 Landsat 数据采用 2 种及以上的算法反演地表温度,均发现单窗算法的反演精度较高,可取得较好反演效果^[16-20].目前,地表温度监测及驱动因素的研究多聚焦于城市区域^[21-23].干旱区流域是孕育城市的主要区域,在“山地—绿洲—盆地”组合的干旱区流域内,地表环境、地表温度变化过程复杂多变,将整个流域作为研究区,更有利于发现地表温度对全球气候变暖和人类活动的响应.

乌鲁木齐河流域地处亚欧大陆的地理中心,流域内有新疆省会城市乌鲁木齐市,以及附近的五家渠市、下游的昌吉市等城市,是丝绸之路经济带的交通枢纽,乌鲁木齐河流域的环境对流经城市的内外生态起到了决定性作用.近年来,随着社会经济的发展,流域内人类活动集中,土地利用/覆被大幅改变,城市扩张迅速.乌鲁木齐河流域内上游人类活动相对较少,中、下游人类活动集中,在气候变化背景下,流域上、中、下游地表温度如何变化尚不明确,对气候变化的响应特征亟待研究.定量监测乌鲁木齐河流域地表温度的时空变化,有利于乌鲁木齐河流域内的城市发展规划,同时对于周边冰川以及绿洲环境的保护意义重大.

因此, 本研究通过利用单窗算法反演 2000, 2005, 2010, 2015, 2021 年 5 期乌鲁木齐河流域地表温度, 反演数据经过归一化处理, 并将反演之后的地表温度进行地表温度的分级处理, 将 LST 大致分为 5 个等级, 分别为极高温区、高温区、中温区、低温区以及极低温区, 结合温度重心转移模型并计算不同土地利用类型对热环境的贡献度, 从空间格局和时间尺度 2 个方面综合分析乌鲁木齐河流域地表温度 22 年的变化特征。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

乌鲁木齐河流域地处欧亚板块中部, 深居内陆, 远离海洋, 整个乌鲁木齐河流域地形结构复杂, 地形起伏大, 类型变化多样, 夏季日照较多, 天气炎热, 极端气温高达 44.5°C , 属于典型温带大陆性干旱气候。以英雄桥以上流域为上游区, 主要为山区分布地; 中游主要是城市区, 由天山区、沙依巴克区、水磨沟区、新市区、头屯河区组成; 下游有米东区 and 五家渠市等, 且分布着大量的耕地及沙漠(图 1)。

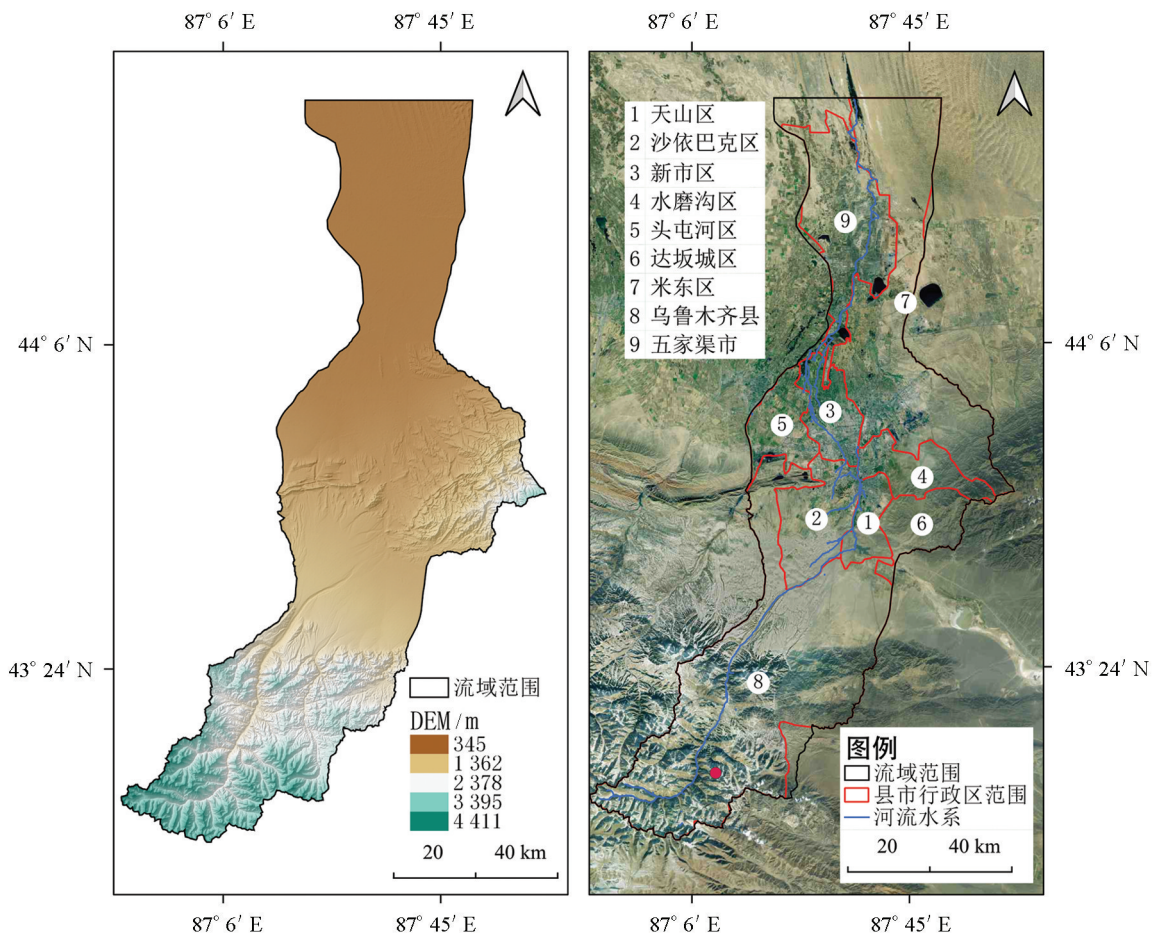


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

本研究选取 2000, 2005, 2010, 2015, 2021 年 5 期 Landsat TM/OLI 的遥感影像, 数据均来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>), 选取 8—9 月时间间隔较小, 且云量较少的影像数据。因 2020 年 8—9 月的影像数据云量多且质量差, 故选用了 2021 年质量好的影像数据来做反演。将获取的遥感影像在 ENVI 软件中进行几何校正、辐射定标、图像裁剪拼接等预处理。另外使用了温度、大气透射率等辅助数据, 分别从小麦芽和 NASA 官方网站(<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)中获取(表 1)。

表 1 影像数据来源列表

影像名	获取时间	行列号	传感器
LT51430292000269BJC00	2000 年 9 月 25 日	143-29/143-30	TM5
LT51430302005250BJC00	2005 年 9 月 7 日	143-29/143-30	TM5
LT51430292010232IKR00	2010 年 8 月 20 日	143-29/143-30	TM5
LC81430292015230LGN01	2015 年 8 月 18 日	143-29/143-30	OLI
LC81430292021214LGN00	2021 年 8 月 2 日	143-29/143-30	OLI

土地利用数据选用武汉大学黄欣教授团队的中国土地覆被产品(空间分辨率为 30 m),该数据基于 30 万景 Landsat 影像,结合现有产品的自动稳定样本和目视解译样本生产获得.选取 2000,2005,2010,2015,2021 年的土地利用数据,包括 9 种土地利用类型,将其重分类为耕地、林地、草地、水体、建设用地和裸地(未利用地)6 类^[24].

2 研究方法

2.1 地表温度反演

地表温度反演主要是基于陆地卫星的 TM6 波段及热红外波段,选用覃志豪等^[25]提出的单窗算法进行地表的温度反演,需计算辐射亮温值、地表比辐射率、大气透过率和大气平均作用温度 4 个参数,单窗算法计算公式如下:

$$T = 1/C \{ a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] \times T_b - D \times T_a \} - 273.15 \quad (1)$$

式中: T 为地表真实温度的取值; T_a 为估计的大气平均相互作用的温度(K); T_b 为辐射亮温值(K); a 和 b 可以根据热辐射强度拟合出来,分别为两个不同的变量系数,当温度在 0~70 °C 时: $a = 0.673\ 553\ 51$, $b = 0.458\ 606$; C 和 D 分别是根据地表比辐射率和空气中的透射率来构建的中间值变量,由式(2)和(3)计算得到.

$$C = \epsilon \times \tau \quad (2)$$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \epsilon)\tau] \quad (3)$$

$$T_a = 16.011 + 0.926\ 21T_0 \quad (4)$$

式中: ϵ 为热红外波段的地表比辐射率; τ 为大气透射率; T_0 为近地面气温(K); 因本研究区所处中纬度地带,且研究时间均为夏季,因此选取公式(4)计算大气平均作用温度.

本研究对大气透射率 τ 的计算使用覃志豪等^[26]模拟的算法估算.大气的透射率是影响红外线辐射传递的重要因素,在估算地表温度时大气水汽含量是计算大气透射率 τ 的关键参数.本研究选用水分含量在 1.6~3.0 g/cm² 的大气水含量值来计算大气透射率,其计算公式为:

$$\tau = 1.031\ 412 - 0.115\ 36\ \omega \quad (5)$$

式中: τ 为大气透射率; ω 为大气水汽含量(g/cm²),由杨景梅等^[27]提出的利用地面湿度计算算法所得.

2.1.1 地表辐射亮温的计算

亮温温度是一个位于探测卫星内部最高点的卫星亮度温度,即在数值上一般与红外遥感所测得的表征温度是相等的,并通常由影像数据直接处理获得.热辐射强度^[28]的值与 DN 值之间有相应数学关系, L_λ 是传感器接收到的辐射强度,也就是所谓的热辐射强度,将 Landsat 5 的 TM6 波段和 Landsat 8 的 TIRS10 波段像元灰度值转换为辐射强度值,进而求出相应的辐射亮温值.

公式如下:

$$L_\lambda = g_{\text{gain}} * q_{\text{QDN}} + f_{\text{offset}} \quad (6)$$

$$L_\lambda = [N_{\text{DN}}(L_{\text{max}} - L_{\text{min}})]/255 + L_{\text{min}} \quad (7)$$

$$T_b = K_2 / (K_1 / L_\lambda + 1) \quad (8)$$

式中: g_{gain} 为波段增益系数,波段增益系数为常数,本研究波段增益系数取值为 0.005 632 156; q_{QDN} 为

影像的热红外波段的灰度值; f_{offset} 为偏移系数, 偏移系数一般为定值, 本研究偏移系数所取数值为 0.123 8; L_{min} 为传感器在光学条件下可以被检测得到的最低辐射亮度; L_{max} 为传感器在光学条件下可以被检测得到的最高辐射亮度. 上述参数从遥感数据文件中获得, 以得出辐射强度值, 再通过公式(8)可计算辐射亮温值; L_{λ} 为辐射强度值; T_b 代表 Landsat 5 的热红外波段即 TM6 和 Landsat 8 的 TIRS10 热红外波段像元灰度值的像元辐射亮温值^[28]; K_1, K_2 为常数, 对于 TIRS10 数据, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{st} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$.

2.1.2 地表比辐射率的计算

地表比辐射率的估算仍采用覃志豪等^[28]的混合模型, 该模型将城镇居民区和水体这 2 种地表类型也考虑到, 通过以下公式来估算地表比辐射率:

$$\epsilon = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_m \epsilon_m + d_\epsilon \quad (9)$$

式中: ϵ 为混合像元的地表比辐射率; P_v 为植被覆盖率; R_v 为植被的温度比; ϵ_v 为植被地表比辐射率; R_m 为建筑表面的温度比; ϵ_m 为建筑表面地表比辐射率; 对于 Landsat 5 影像, $\epsilon_v = 0.986$, $\epsilon_m = 0.972$; 而 Landsat 8 的 TIR10 波段的数据, $\epsilon_v = 0.986\,72$, $\epsilon_m = 0.967\,67$; d_ϵ 为地表几何分布及内散射效应, 可以根据地表类型的构成比例估计, 在地表相对较为平整的情况下, 可取 $d_\epsilon = 0$.

根据覃志豪等^[28]的研究结果可知, 植被、建筑表面的温度比辐射率公式为:

$$R_v = 0.933\,2 + 0.585\,0 P_v \quad (10)$$

$$R_m = 0.988\,6 + 0.128\,7 P_v \quad (11)$$

$$V_{\text{NDVI}} = (I_{\text{NIR}} - R)/(I_{\text{NIR}} + R), P_v = (V_{\text{NDVI}} - V_{\text{NDVI min}})/(V_{\text{NDVI max}} - V_{\text{NDVI min}}) \quad (12)$$

式中: P_v 为植被覆盖率, 可以由归一化植被指数 NDVI 计算而得; R 为红光波段; I_{NIR} 为近红外波段; $V_{\text{NDVI max}}$ 是指地表被植被完全覆盖之后的 NDVI 的取值, $V_{\text{NDVI min}}$ 为地表完全没有植被覆盖的自然地面的 NDVI 值; 采用覃志豪等^[28]的经验值: $V_{\text{NDVI max}} = 0.7$, $V_{\text{NDVI min}} = 0.05$ 来估算.

温度等级水平的划分依据自然间断点分级法, 将地表温度划分为极高温、高温、中温、低温和极低温 5 个等级.

2.2 重心转移模型

地表温度重心迁移的轨迹能够直接地反映出地表能量在这段时间内的分布变化, 轨迹方向说明地表温度空间变化的方向和趋势, 距离能够反映地表温度在空间上再分布的活跃程度^[29], 重心转移公式为:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_{ti})}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_{ti})}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad (13)$$

式中: X_t, Y_t 为第 t 年流域 LST 分级范围内的重心坐标; n 为 LST 分级范围内的像元数; C_{ti} 为第 t 年 i 像元的地表温度; X_{ti}, Y_{ti} 分别为第 t 年 i 像元的几何中心坐标.

2.3 贡献度指数

流域下垫面由多种土地利用类型构成, 土地利用显示出很大的空间异质性, 因此, 不同类型的土地利用对局部热环境的影响机制也有一定差别^[30]. 热环境的贡献程度可以通过贡献度指数 (Contribution Index, CI) 来定量评估:

$$W_{C_i} = (L_{\text{LST}_i} - L_{\text{LST}}) \times \left(\frac{S_i}{S} \right) \quad (14)$$

式中: i 为 6 类土地利用类型; W_{C_i} 为 i 类土地利用类型对热环境的贡献度; L_{LST_i} 为 i 类土地利用类型的平均地表温度; L_{LST} 为研究区平均地表温度; S_i 为 i 类土地利用类型的面积; S 为研究区总面积; 若 $W_{C_i} \geq 0$, 则 i 类土地利用类型与地表温度的升高呈正相关; 若 $W_{C_i} < 0$, 则 i 类土地利用类型与地表温度的升高呈负相关.

3 乌鲁木齐河流域地表温度时空变化特征

3.1 地表温度时空变化特征

3.1.1 LST 年际变化

对乌鲁木齐河流域 LST 最高、最低、平均温进行统计(图 2), 2000—2021 年乌鲁木齐河流域地表温度总体特征表现为: 最低温、平均温均呈显著上升趋势, 最高温呈波动变化, 相对平稳, 整体地表温度在逐步上升, 流域地表热量活跃度高(图 2). 从平均 LST 线性趋势可知, 研究期间 LST 速率为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 呈现升高趋势; 其中 2000 年地表温度均略低于其他 4 个时期, 主要是因为 2000 年 8 月, 研究遥感影像质量不佳, 选用 9 月低影像代之, 其他 4 个时期影像选取于 8 月, 乌鲁木齐河流域 9 月底已开始降温, 因此 2000 年温度比其他年份总体偏低. 最低 LST 也呈上升趋势, 速率为 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 其原因可能是全球气候变暖趋势下, 上游山区积雪冰川加速消融, 底层岩石开始裸露, 吸收太阳辐射形成升温. 也有研究发现, 全球气候变暖呈间歇性, 从而也能解释最高 LST 呈波动变化.

3.1.2 LST 时空格局变化

影响 LST 时空分布的因素主要有日照、海拔、地形起伏和土地利用类型等, 因流域地形复杂, 将研究区 5 个不同时期的 LST 分为 5 个等级, 得到 2000—2021 年乌鲁木齐流域 LST 空间分布图(图 3、图 4), 对流域 LST 与海拔进行相关性分析(图 5), 结果表明: LST 与海拔呈显著负相关, 结合 LST 空间分布图可以发现: 2000—2021 年乌鲁木齐河流域 5 个温度区域普遍发生变化, 总体看来, 研究期间 LST 等级面积均以高温、极高温区为主, 极低、低温区面积占比较少. 在 2000—2021 年期间, 极低温、低温区面积呈增长趋势, 极低温多分布在上游高海拔的山地和中游的石人沟, 上游主要分布着 1 号冰川及森林密集地, 冰川和森林土地覆盖类型具有低 LST 特性; 低温区主要分布在下游的青格达湖、八一水库等水域附近, 从 2000 年的中温区在 2010 年转变为了低温区, 2021 年此处又重新成为了中温区. 中温区在研究期间分布面积呈波动变化, 中温区一般分布在中游城市区边缘地带及下游耕地分布区; 高温区面积占比在急速下降, 从 2000 年的 45% 降至 2021 年的 26%, 减少部分多已转为极高温区, 高温区多分布于中游的城镇居民区; 极高温区在 22 年间呈波动增加趋势, 在 2010 年的面积占比最大, 为 36%, 其次是 2021 年, 为 33%, 研究期间极高温区面积比例呈升高的趋势, 极高温多出现在乌鲁木齐河流域中下游, 即穿过乌鲁木齐市以及五家渠市的城镇居民区以及下游昌吉附近的沙漠地带, 位于下游沙漠地区的 LST 最高, 沙漠地区气候导致乌鲁木齐河流域下游的温度整体高于其他地方的温度.

综合来看, 2000—2021 年期间, 乌鲁木齐河流域地表温度极低温、低温和极高温的极端温度占比持续增加, 中温区波动相对较小, 高温区急剧较少, 主要转为极高温.

对比 5 个时期的 LST 等级分布图(图 3)并结合乌鲁木齐流域县市图可以直观看出, 位于上游天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和乌鲁木齐县的地表温度较低, 而位于乌鲁木齐市人口相对密集的沙依巴克区、天山区、水磨沟区、达坂城区地表温度相对较高, 同时位于中游的昌吉市、新市区以及头屯河区的地表温度相对较低, 主要多因昌吉市、新市区以及头屯河区的经济正在发展中, 人口密度相对较低, 人为因素对于该区地表温度的分布影响较小. 位于下游的五家渠市、阜康市以及米东区的温度升高, 主要由于这 3 个县区临近沙漠, 自然因素导致下游的温度增高.

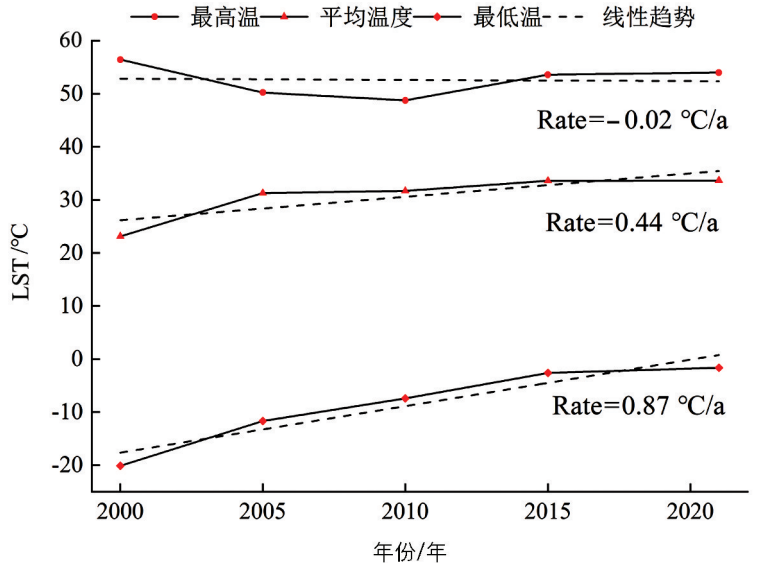


图 2 2000—2021 年乌鲁木齐流域地表温度变化趋势

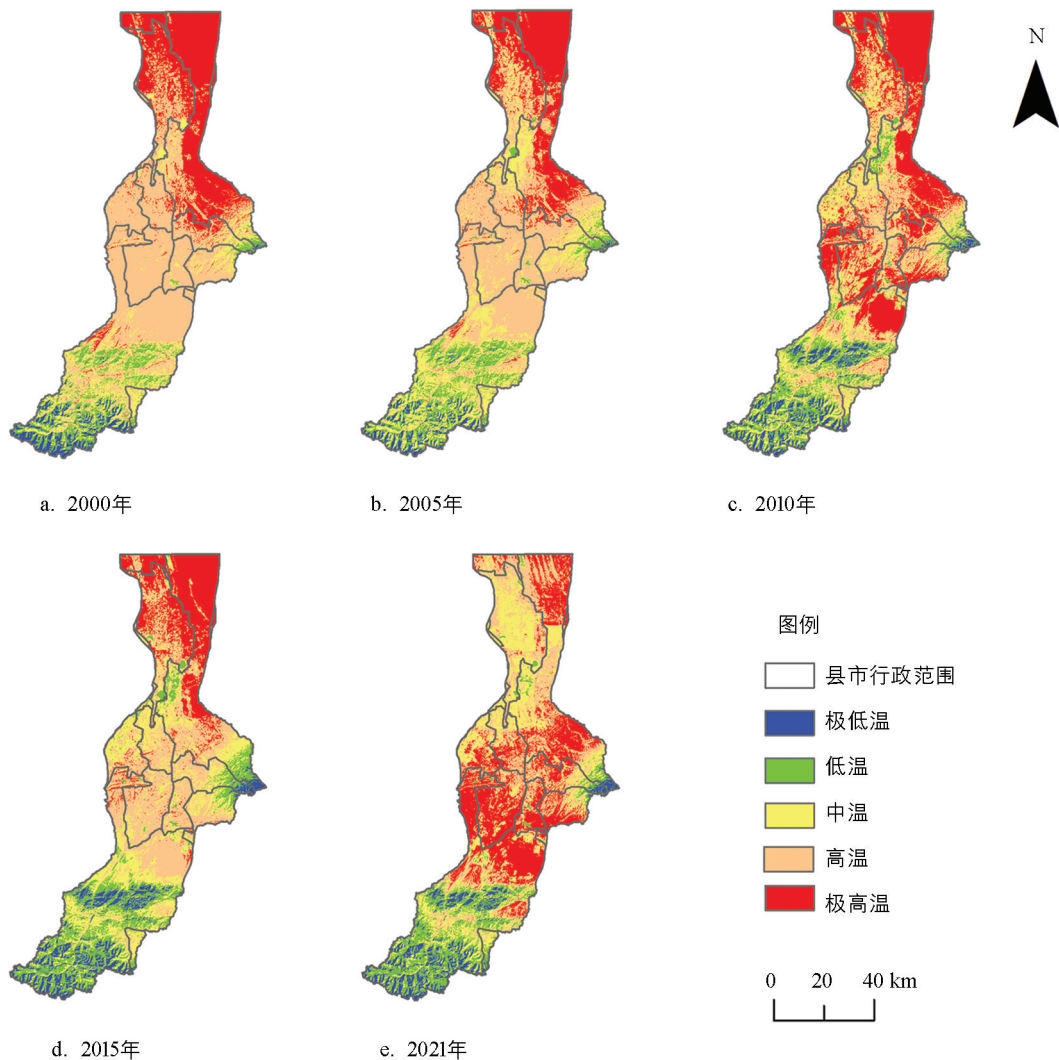


图 3 乌鲁木齐河流域地表温度等级分布图

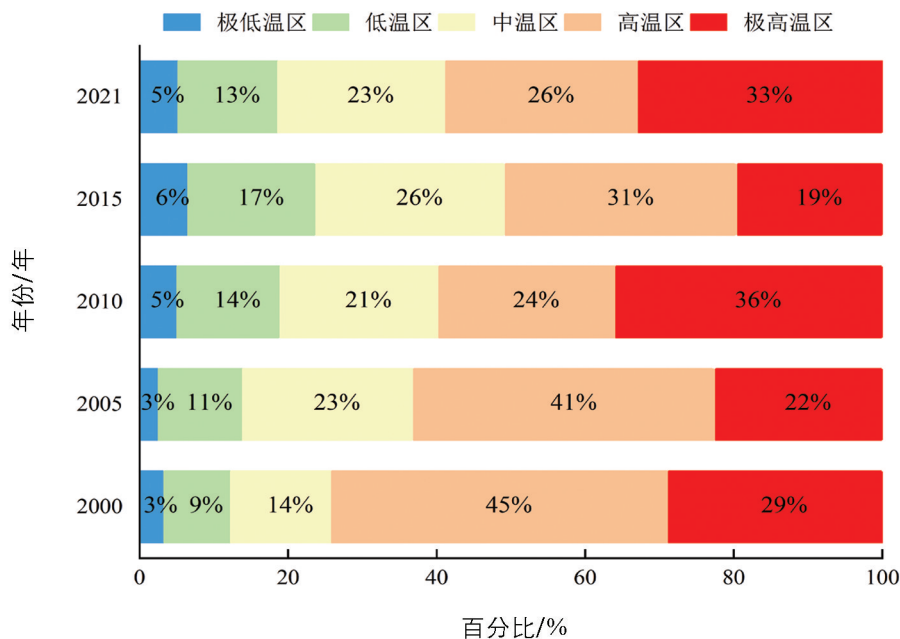


图 4 乌鲁木齐河流域地表温度分级面积统计

3.2 地表温度等级重心转移

各区重心迁移方向差异表示地表能量迁移趋势不同, 迁移距离越长表示地表能量再分布的活跃程度越高, 反之, 则表示地表能量再分布的活跃程度越低. 利用重心转移分析各温度分级在空间上的变化(图 6), 分析可知: 在研究期间极低温、低温区温度重心变化都在向北流域中游方向移动, 2000—2005 年间极低温区温度重心主要在上游山区, 而 2005—2010 年间向北转移了 12.69 km; 2000—2021 年间乌鲁木齐河流域高温、中温区集中分布在流域中游, 即城市分布区, 其中, 2000—2021 年中温区温度重心向北转移, 即从乌鲁木齐县转移到新市区; 高温区温度重心变化向北偏东方向移动, 即从沙依巴克区移动到米东区, 这 4 个时间段中, 2015—2021 年重心转移距离最长, 为 17.29 km(表 2); 极高温区温度重心在研究期间主要从裸地边缘移动到流域中游, 即城市区周围, 2015—2021 年重心转移距离最长, 为 53.30 km, 极高温区 4 个时间段 LST 重心转移距离比其他温度分级都长, 这与城市发展等人为因素对流域地表热环境贡献最大有关; 各等级地表温度重心都有向中游市区靠拢的现象, 这与城镇分布区建筑面积增加有着密切关系.

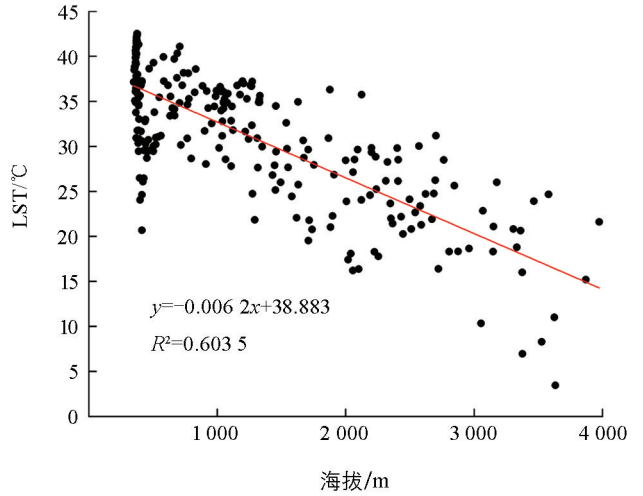


图 5 LST 与海拔之间的关系

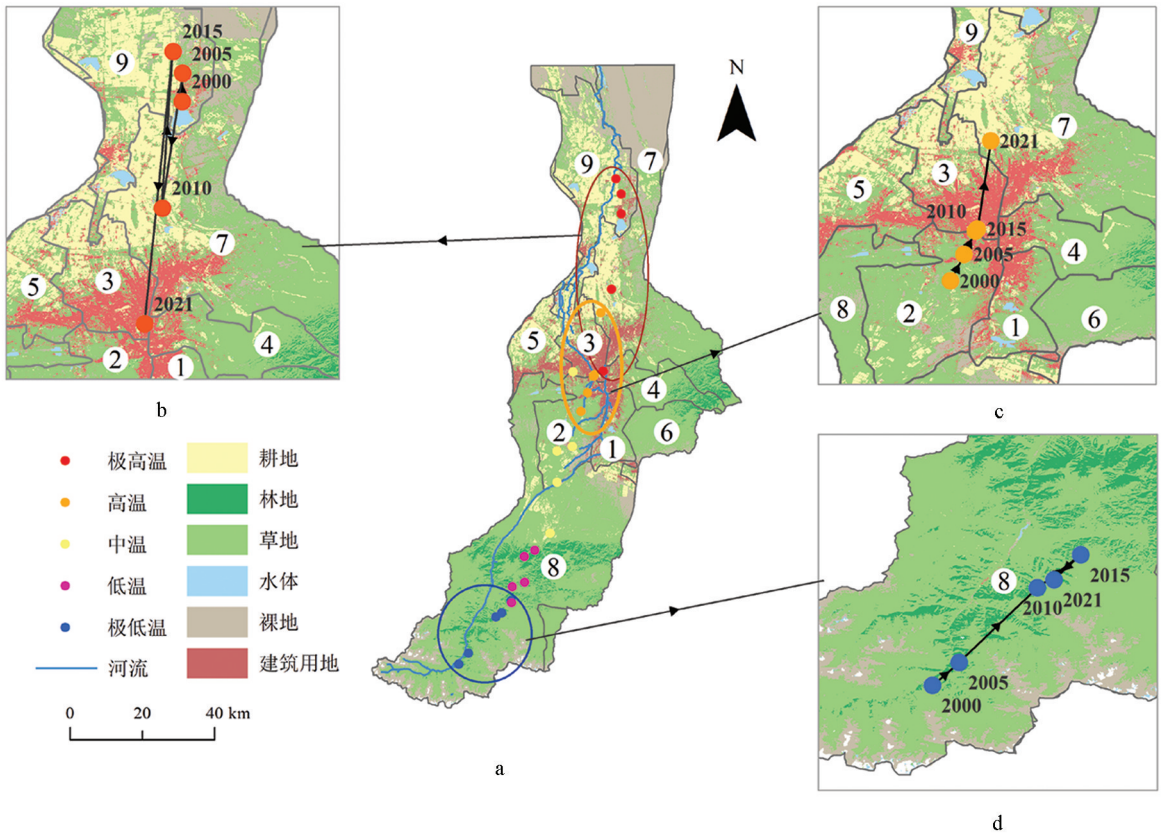


图 6 乌鲁木齐河流域地表温度重心变化

表 2 地表温度重心转移距离

km

	2000—2005 年距离	2005—2010 年距离	2010—2015 年距离	2015—2021 年距离
极高温	5.56	26.74	30.59	53.30
高温	5.55	4.82	0.54	17.29
中温	14.26	8.33	4.49	20.72
低温	6.80	7.15	3.29	11.89
极低温	4.05	12.69	6.18	4.31

3.3 不同土地利用类型的温度变化特征及对热环境贡献度差异

不同下垫面类型因其热容量不同, 会使得 LST 表现出较大的差异性^[31]. 为研究不同类型下垫面对乌鲁木齐河流域的热效应贡献度, 将下垫面类型与温度结合, 制得乌鲁木齐河流域不同土地利用类型的 LST 统计图(图 7), 计算 2000—2021 年不同土地利用类型对城市热环境的贡献指数(图 8). 分析可得: 对比 2000, 2005, 2010, 2015, 2021 年 5 个时期各土地利用类型的 LST, 其差异明显, 且具有一致的规律: 一是在 2000—2021 年间建设用地的 LST 高于各用地类型的 LST, 在 2010—2015 年期间 CI 值的由负变正, 2015 年 CI 值最大, 为 0.21, 是 LST 升高的主要贡献源. 二是建筑用地 LST 逐年升高, 主要由于在此期间城市发展速度快, 建筑用地面积增加最大, 改变下垫面属性, 导致城市热岛现象加剧; 耕地多分布在下游, 2000—2021 年 LST 均低于流域均温. 其中, 2010—2015 年, 耕地 CI 值由负变正, 从 -0.76 升至 0.07, 表明耕地面积减少成为 LST 升高的贡献源. 未利用地(裸地)在研究期间呈增加趋势, 分布范围较为发散, 在上游山区裸地和下游的沙漠均有分布, 未利用地 2010 年 CI 值从 -0.24 升至 2015 年 0.85, 2010—2015 年间未利用地对 LST 升高为正贡献; 此外, 草地、林地和水体在 5 个时期的 CI 值均 < 0, 表明这 3 种地类对 LST 升高为负贡献. 草地面积分布最广, 在研究期间 LST 均低于流域均温, CI 绝对值在 2005 年达到最大, 为 2.93, 大面积的绿色植被覆盖通过蒸腾作用吸收热量对流域起着降温作用; 林地集中分布在上游, 上游多为山区高海拔地区, 对 LST 贡献仅次于草地, 林地 LST 低于流域均温. 水体在研究期间对 LST 升高均为负贡献, 且 LST 最低, 水体面积呈逐年减少趋势, 主要分布范围在乌鲁木齐河流域上游山区的冰雪和冰川, 冰雪和冰川对流域气候变化起着重要作用. 整体看来, 除 2015 年外, 其余时期 LST 最高的为建筑用地, 其余依次为裸地(未利用地)、耕地、草地、林地和水体. 值得注意的是, 2015 年各土地利用类型 LST 整体高于其他时期, 且 2015 年未利用地(裸地)LST 高于建筑用地. 据记录, 2015 年, 在全球气候变暖的背景下, 受超强厄尔尼诺事件影响, 新疆出现了有气象记录以来的最暖年, 全疆年平均气温 9.0 °C, 较历年同期偏高 1.1 °C, 偏高幅度破历史极值^[32].

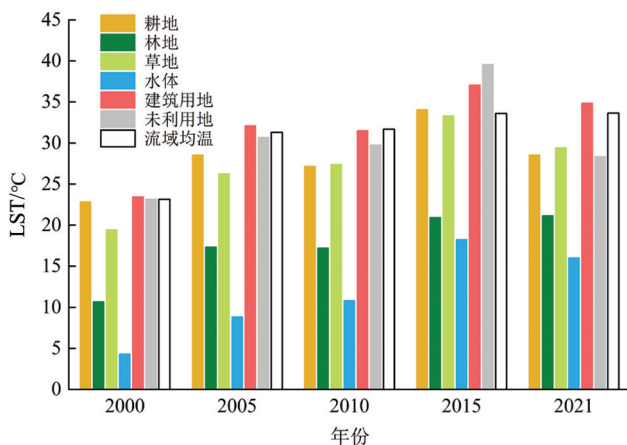


图 7 乌鲁木齐河流域不同土地利用类型的
地表温度统计图

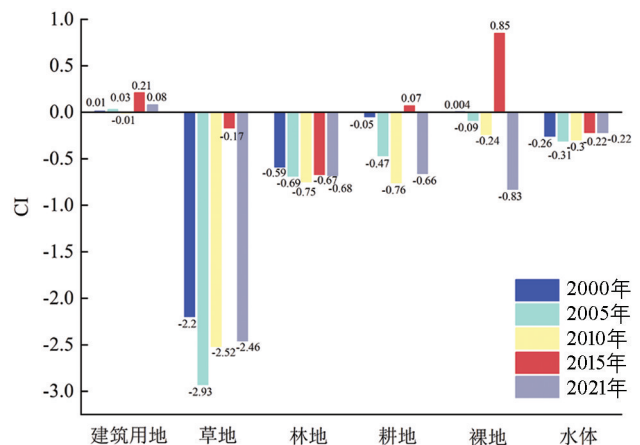


图 8 乌鲁木齐河流域不同土地利用类型
贡献度指数

4 结论

本研究基于 2000—2021 年的 5 期 Landsat 遥感卫星影像,使用单窗算法对乌鲁木齐河流域的地表温度进行反演,并将反演的地表温度进行分级,使用重心转移模型,结合土地利用类型计算各地类贡献度指数,定量分析乌鲁木齐河流域地表温度的变化特征,主要结论如下:

1) 乌鲁木齐河流域 2000—2021 年的 5 个时间段 LST 等级面积均呈正态分布,研究区主要以高温区、极高温区为主,占流域面积的 50%~70%,其次是中温区,占流域面积的 15%~25%,低温区和极低温区占比较小,主要分布在山区林地,中温区主要分布在城市区边缘.极低温、低温和极高温的极端温度面积占比持续增加,中温区面积变化相对平衡,高温区急剧减少,主要转为极高温区.

2) 从地表温度重心转移变化来看,流域 5 个温度区的心迹基本都在向中游转移,中游为人口密集的城镇居民区.其中极高温区的转移最为显著,从下游裸地边缘转移到中游城市居民区.

3) 2000—2021 年间,研究区的土地利用类型中建筑用地面积的增幅最为显著,贡献度指数 CI 值最大,为 0.21,促进了地表温度的上升.各土地利用类型的贡献度从大到小依次为:草地、林地、水体、耕地、未利用地、建设用地,其中,只有建设用地为正贡献.

参考文献:

- [1] 田浩,刘琳,张正勇,等. 2001—2020 年中国地表温度时空分异及归因分析 [J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1713-1729.
- [2] 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 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 899-920.
- [3] RAWAT V, SARAF A K, DAS J, et al. Anomalous Land Surface Temperature and Outgoing Long-Wave Radiation Observations Prior to Earthquakes in India and Romania [J]. Natural Hazards, 2011, 59(1): 33-46.
- [4] 郝璐,孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述 [J]. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.
- [5] WILLIE Y A, PILLAY R, ZHOU L, et al. Monitoring Spatial Pattern of Land Surface Thermal Characteristics and Urban Growth: A Case Study of King Williams Using Remote Sensing and GIS [J]. Earth Science Informatics, 2019, 12(4): 447-464.
- [6] ZHAO W, HE J L, WU Y H, et al. An Analysis of Land Surface Temperature Trends in the Central Himalayan Region Based on MODIS Products [J]. Remote Sensing, 2019, 11(8): 900.
- [7] MALAKAR N K, HULLEY G C, HOOK S J, et al. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(10): 5717-5735.
- [8] 宋云帆,闵文彬,彭骏. 成都城市下垫面变化对地表热场的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 197-206.
- [9] 宋挺,段峥,刘军志,等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比 [J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 451-464.
- [10] 屈创,马金辉,夏燕秋,等. 基于 MODIS 数据的石羊河流域地表温度空间分布 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 125-133.
- [11] 热伊莱·卡得尔,玉素甫江·如素力,阿迪来·乌甫,等. 2001—2014 年博斯腾湖流域地表温度时空分异特征及归因 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 257-265.
- [12] 吴志刚,江滔,樊艳磊,等. 基于 Landsat 8 数据的地表温度反演及分析研究——以武汉市为例 [J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 135-142.
- [13] 蒋大林,匡鸿海,曹晓峰,等. 基于 Landsat 8 的地表温度反演算法研究——以滇池流域为例 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 448-454.
- [14] 徐涵秋. 新型 Landsat 8 卫星影像的反射率和地表温度反演 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747.
- [15] 覃志豪,ARNON K. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法 [J]. 国土资源遥感, 2001, 13(2): 33-42.
- [16] 金点点,宫兆宁. 基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例 [J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 830-841.

- [17] 张成才, 陈东河, 董洪涛. 基于 Landsat-5 TM 数据的河南省白沙灌区地表温度反演研究 [J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 964-968.
- [18] 黄妙芬, 邢旭峰, 王培娟, 等. 利用 LANDSAT/TM 热红外通道反演地表温度的三种方法比较 [J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 132-137.
- [19] 袁亚平, 种丹, 李浩杰, 等. 基于 HJ-1B 卫星数据的疏勒河上游流域地表温度反演 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 954-962.
- [20] 朱伊, 范广洲, 华维, 等. 1981—2015 年青藏高原地表温度的时空变化特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(11): 127-140.
- [21] 周玄德, 郭华东, 夜比布拉·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.
- [22] 魏莉莉, 蒋求名, 马捷, 等. 昆明主城区土地覆盖时空分布及地表温度响应 [J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 56-61.
- [23] 梁洪武, 阿里木江·卡斯木, 张雪玲, 等. 干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素——以天山北坡城市群为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3650-3664.
- [24] YANG J E, HUANG X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [25] 覃志豪, ZHANG M H, ARNON K, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [26] 覃志豪, LI W J, ZHANG M H, 等. 单窗算法的大气参数估计方法 [J]. 国土资源遥感, 2003, 15(2): 37-43.
- [27] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(1): 9-22.
- [28] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计 [J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32, 36.
- [29] 李文亮, 张丽娟, 陈红, 等. 哈尔滨市城市扩展与地表热环境变化关系研究 [J]. 地域研究与开发, 2010, 29(2): 49-52, 58.
- [30] 孙宗耀, 孙希华, 徐新良, 等. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1313-1322.
- [31] 帅晨, 沙晋明, 林金煌, 等. 不同下垫面遥感指数与地温关系的空间差异性研究 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1657-1666.
- [32] 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响 [J]. 气象学报, 2016, 74(3): 309-321.

责任编辑 包颖
崔玉洁