

基于遥感的银川市城区热环境及其影响因素的 时空演变特征

张晓东^{1,2}, 赵银鑫¹, 褚小东¹, 吴文忠¹, 马风华¹, 张勇¹, 吉卫波¹

(1.宁夏回族自治区地质调查院, 银川 750021; 2.中国地质大学(北京) 信息工程学院, 北京 100083)

摘要:为掌握银川市城区热环境及其影响因素的时空变化特征,以 4 期 Landsat 遥感数据为基础,反演地表温度,采用热岛比例指数、贡献度指数和像元二分模型分析 28 a 间区域热环境、土地利用和植被的空间分布及其时空演变特征,探讨了地表温度变化及其影响因素的响应关系。研究表明:(1) 28 a 间,城市热岛比例指数(URI)整体呈上升趋势,热环境呈现出西部地表温度整体高于东部的特征,热岛区域逐渐集中分布于城市建成区。(2) 研究区明显升温面积占比为 7.38%,而明显降温区域比例仅为 1.47%,总体上热环境呈升温趋势。(3) 4 个年份的未利用土地和草地面积逐年减少,而城乡工矿居民用地面积逐年增加且保持较高增长速度,耕地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地对城区热环境贡献较大。(4) 植被覆盖度表现出东部相对较高、西部较低的特点,28 年间研究区植被覆盖度较高且整体呈现减小趋势,4 个年份的地表温度与植被覆盖度呈负相关关系。银川市城区热环境变化与土地利用类型和植被覆盖度关系密切,各土地利用类型对热环境贡献度表现出差异性,植被覆盖度与其呈负相关。

关键词:遥感; 热环境演变; 地表温度; 土地利用; 植被覆盖度

中图分类号:P461; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0180-08

Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Thermal Environment and Its Influencing Factors in Urban Area of Yinchuan City Based on Remote Sensing

ZHANG Xiaodong^{1,2}, ZHAO Yinxin¹, CHU Xiaodong¹,
WU Wenzhong¹, MA Fenghua¹, ZHANG Yong¹, JI Weibo¹

(1.Ningxia Geological Survey Institute, Yinchuan 750021, China; 2.School of Information
Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to well know the temporal and spatial characteristics of the thermal environment and its influencing factors in Yinchuan City, land surface temperature (LST) of study area of 4 years were retrieved by using Landsat remote sensing data of 4 periods in 28 years (1989—2017). The spatial distribution and the space-time evolution characteristics of variation of thermal environment, land use and vegetation coverage were studied by employing urban-heat-island Ratio index (URI), contribution index and dimidiante pixel model. Then the response relationship between LULC, vegetation changes for different periods and LST was discussed. The results showed that: (1) URI had increased by 0.138, which tended to be on the rise; meanwhile, thermal environment of 4 years showed that the spatial distribution characteristics that LST in the west of study area was higher than that in the east as a whole and the heat island area concentrated in urban built-up areas gradually because of rapid urbanization; (2) the significantly warming area accounted for 7.38% of total area, however the significantly cooling area just accounted for 1.47%, the thermal environment presented the warming trend on the whole; (3) the areas of unused land and grassland decreased year by year, and built-up land increased gradually with a high growth rate; Among 6 types of land uses, farmland, water, built-up land and unused land presented the major contribution to thermal environment; (4) the vegetation coverage of study area took on the features of relative high vegetation coverage in the east and low

收稿日期:2020-01-04

修回日期:2020-02-20

资助项目:宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC03444);宁夏回族自治区财政厅财政专项“银川都市圈城市地质调查项目”(宁财(预)发[2017]320号)

第一作者:张晓东(1980—),男,宁夏固原人,高级工程师,博士,主要从事环境遥感应用研究工作。E-mail:33131692@qq.com

in the west, which was at the high level generally and presented a tendency of degeneration as a whole; LST showed the negative correlation with vegetation coverage in 4 periods. The thermal environment of Yinchuan had close relationship with LUCC and vegetation coverage, and the types of LUCC showed the significant differences of the correlations to the thermal environment contribution, while vegetation coverage had negative correlation with LST.

Keywords: remote sensing; thermal environment evolution; land surface temperature; land use; vegetation coverage

目前,城市化及其影响因素变化已成为科学家和城市规划者的最为关心的问题之一^[1]。由于人口的快速增长和土地利用方式的快速变化,地表地理特征(植被、森林、裸地和水体)的持续变化影响地球对太阳辐射的吸收和反射特性,从而改变城市及周围的地表温度,导致城市热环境发生变化^[2]。城市热环境是指能够影响人体对冷暖的感受程度、健康水平和人类生存发展等与热有关的物理环境,其演变过程与人类社会和经济活动关系密切,是城市生态环境状况的综合概括与体现^[3-4]。通过研究城市热环境演变过程,建立地表温度空间变化与土地利用、植被的联系,不仅可以揭示城市热空间结构的发展变化情况,而且对指导城市绿化建设、景观优化布局、生态规划等方面具有重要意义^[5-7]。近年来,基于遥感技术研究城市热环境演变及其与土地利用、植被覆盖的关系已成为国内外学者研究城市地表热环境的重要内容^[8-10]。

银川市是宁夏回族自治区首府,是国家“十三五”重点建设区域“沿黄城市带”的核心城市,改革开放后发展十分迅速,城镇化水平不断提高,城市面积不断扩大,城市热环境空间格局发生了很大变化。因此,研究银川市热环境及其影响因素的变化特征,掌握其空间演变规律对揭示城市热岛效应的形成机制、指导城市规划以及城市的绿化建设具有重要的理论和实践意义。目前,在银川市开展的热环境变化研究主要为热力景观或热岛时空变化分析^[11-12],其热环境时空演变过程及其与土地利用和植被覆盖在空间上的关联性有待进一步研究。本文基于 4 期 Landsat 系列遥感数据,反演不同时期地表温度,分析 28 a 间区域热环境的空间分布及其时空演变特征,探讨不同时期各土地利用类型和植被与区域热环境的关系,以期缓解银川市城区热岛效应和环境规划管理提供参考依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本文根据《银川市城市总体规划(2011—2020 年)》,选取银川市城区包括西夏区、金凤区、兴庆区以及贺

兰县为研究区,地理坐标为 $38^{\circ}21'58''$ — $38^{\circ}37'52''$ N, $106^{\circ}0'50''$ — $106^{\circ}26'11''$ E,总面积约为 $1\,088.93\text{ km}^2$ 。研究区气候属温带大陆性气候,降水稀少,蒸发强烈,气候干燥,年平均气温为 8.5°C ,多年平均降水量约 250 mm 。地表水水源充足,水质良好,沟渠成网,湖泊湿地众多;土壤类型主要为山地灰钙土、草甸土和灰褐土;植被以草原为主,森林较少,树种多为杨树(*Populus simonii*)、柳树(*Salix babylonica*)、榆树(*Ulmus pumila*)等耐旱型植物,2017 年全市森林覆盖率为 16% 。地形总体呈西部高、东部低的特点,平均海拔 $1\,100\sim 1\,200\text{ m}$,地貌属冲积平原。自西部大开发以来,银川市经济快速发展,城市扩张明显,截至 2017 年末,研究区城镇人口 $1\,414\,057$ 人。随着城市规模的不断扩大,城市下垫面性质也随之改变,使城市热环境及其空间分布格局发生了很大变化,城市热岛效应显著增强。自 2000 年以来,银川市、贺兰县和永宁县 35°C 以上的天数呈上升趋势,夏季发布高温黄色、橙色、红色警报的日数较以往都有所增加。

1.2 数据源及预处理

本文使用的遥感数据主要为 Landsat 系列遥感数据,其中 Landsat 5 TM 影像获取日期分别为 1989 年 8 月 24 日、1999 年 8 月 12 日和 2010 年 7 月 1 日, Landsat 8 OLI 和 TIRS 影像获取日期为 2017 年 9 月 6 日,影像质量完好,无云和条带。根据本文研究需求,土地利用分类采用耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地 6 个一级类型分类系统。土地利用数据来源为:1989 年的土地利用数据基于同时期的 TM 遥感影像,采用支持向量机(SVM)方法对其进行监督分类^[13],经精度评价其总体分类精度约为 86% ;2000 年、2010 年和 2017 年土地利用数据(1:10 万)来自中国科学院资源环境科学数据中心,其一级类型综合评价精度可达到 85% 以上,已广泛应用于区域及城市热环境时空格局变化分析研究中^[14]。此外,选取地理空间数据云提供的 MODIS 地表温度 8 d 合成产品作为验证数据评价地表温度反演精度,由于 1989 年和 1999 年没有与 TM 数据相同日期的 MODIS 数据,因此本研究只下载使用了 2010 年

和 2017 年与 Landsat 数据相同日期的 MODIS 地表温度产品。以上数据在 ENVI 5.0 中完成了大气校正、几何校正、图像裁剪等预处理,几何校正均方根误差(RMSE)控制在 0.5 像元内。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

地表温度对研究城市热环境时空分布格局和热岛效应具有深远意义,遥感技术能够快速准确地监测城市地表下垫面温度,已成为开展城市热环境变化趋势及动态评价研究的主要技术手段^[8]。对于 Landsat 5 TM6 波段,根据文献^[15]计算提取其地表温度,计算公式如下:

$$L_6 = \text{gain} \cdot \text{DN} + \text{bias} \quad (1)$$

$$T_b = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1) \quad (2)$$

$$T_s = T_b / [1 + (\lambda_6 T_b / \alpha) \cdot \ln \epsilon_6] \quad (3)$$

式中: L_6 为传感器处的辐射亮度值;DN 为像元灰度值;gain, bias 为 TM6 波段的增益与偏置,分别取 0.056 322, 1.238; T_b 为像元亮度温度; T_s 为地表温度; K_1 和 K_2 为定标参数,取值分别为 607.76 W/(m² · sr · μm), 1 260.56 K; 中心波长 λ_6 取 11.475 μm; α 取 1.438 × 10⁻² mK; ϵ_6 为基于 TM6 波段的地表比辐射率。

Landsat 8 则基于波段 10 利用辐射传输方程反演地表温度^[16],其计算公式为:

$$T_s = C_1 / \lambda_{10} \ln \left(\frac{C_2}{\lambda_{10}^5 \{ L_{10} - I_{10}^{\uparrow} - \tau_{10} [(1 - \epsilon_{10}) I_{10}^{\downarrow}] / \tau_{10} \epsilon_{10} \}} + 1 \right) \quad (4)$$

式中: C_1, C_2 为常数,分别取值为 14 387.7 (μm · K) 和 1.191 04 亿 W · μm⁴/(m² · sr); λ_{10} 取 10.9 μm; ϵ_{10} 为 TIRS10 波段的地表比辐射率; τ_{10} 为大气在 TIRS10 波段的透过率; I_{10}^{\uparrow} 和 I_{10}^{\downarrow} 分别为大气向上、向下辐射亮度。参考中纬度夏季标准大气剖面,依据影像成像时间和中心经纬度,采用插值大气剖面方法,获取到 τ_{10} 为 0.91; I_{10}^{\uparrow} 为 0.68 W/(m² · sr · μm); I_{10}^{\downarrow} 为 1.19 W/(m² · sr · μm),地表比辐射率采用 NDVI 阈值法获取^[17-18]。

2.2 热岛比例指数

同一地区不同时期所获取的太阳辐射能量不同,不能直接对绝对地表温度值进行比较。为有效减小不同时期地表温度的差异,本文采用徐涵秋等^[19]提出的地表温度正规化方法和城市热岛比例指数定量研究 4 个时期研究区城市热环境变化。该指数已被国家环境保护部和住房和城乡建设部引用,并广泛应用与城市热环境变化的研究中^[20],其计算公式分别为:

$$T^* = (T_i - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (5)$$

式中: T^* 为第 i 个像元正规化后的值; T_i 为第 i 个像元的地表温度值; T_{\min} 为地表温度的最小值; T_{\max} 为地表温度的最大值。

$$\text{URI} = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (6)$$

式中:URI 为城市热岛比例指数; m 为正规化等级指数; n 为城区高于郊区的温度等级数; w_i 为权重值,取第 i 级的级值; p_i 为第 i 级的百分比。

2.3 贡献度指数

城市地表由不同土地利用类型组成,其对城市热环境贡献差异性明显,因此根据不同土地利用类型对城市热环境影响作用差异构建城市热环境的源和汇,二者分别表示对城市热环境起升温 and 降温作用的土地利用类型。源汇景观对城市热环境的贡献程度可通过贡献度指数 (Contribution index, CI) 定量表征^[14]。为探讨不同时期土地利用类型对研究区城市热环境的影响程度,本文选用贡献度指数描述土地利用类型对城市热环境贡献度,其正负值分别表征土地利用类型对城市热环境的升温(源)和降温(汇)作用,其表达式为:

$$\text{CI} = D_i \cdot S \quad (7)$$

式中:CI 为研究区内土地利用类型对热环境的贡献度指数; D_i 为该区域某种土地利用类型地表平均温度与区域地表平均温度差值; S 为该区域某种土地利用类型占区域面积的比例。

2.4 像元二分模型

像元二分模型是以线性混合像元分解模型为基础的一种计算植被覆盖度的常用方法。Gutman 等^[21]发现了植被覆盖度与 NDVI 之间的半经验关系,并构建了从 NDVI 中提取植被覆盖度的混合像元模型,该模型表达式为:

$$f_c = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (8)$$

式中: f_c 为植被覆盖度; NDVI 为归一化植被化指数; NDVI_{veg} 为纯植被 NDVI 值; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯裸土 NDVI 值。

NDVI_{veg} 值与 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 的值应根据不同研究区的具体情况来确定^[22]。本研究分别对 4 期 NDVI 影像数据进行直方图统计,确定 NDVI_{veg} 和 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 的值分别在累积概率 95% 和 5% 处。

3 结果与分析

3.1 热环境时空变化

根据公式(1)~(4)反演得到研究区 4 个时期的地表温度,由于无法获得与影像数据同时期的地面观测点温度,因此选用 MODIS 地表温度产品进行地表

温度反演精度检验。首先将其重采样至空间分辨率为 30 m,然后与 Landsat 数据进行配准,最后随机生成点间距为 1 000 m 的 198 个点,分别提取 2010 年和 2017 年的 MODIS 地表温度产品数据和 Landsat 反演得到的地表温度反演数据并进行相关性分析,结果显示 2 个年份的相关系数分别为 0.71,0.73,较好地满足研究需求。

利用公式(5)将反演得到的 4 个时期的地表温度正规化,采用相同分级标准将正规化后的地表温度影像分为特高温、高温、较高温、中温、次中温、较低温和低温 7 个等级(图 1),统计各等级的面积并根据公式(6)计算 4 个时期的城市热岛比例指数(表 1),本研究中正规化温度等级为 7 级,热岛由特高温、高温和

较高温 3 个等级构成,取 $m=7,n=3$ 。结果表明,28 a 间 4 个年份的热环境呈现出西部地表温度整体高于东部的特征,且由于城市化进程的不断加速,城市扩展不断扩大,热岛区域面积持续增加,城市热环境空间格局发生了较大变化。1989—1999 年,热岛范围有所扩大,面积增加了约 72.91 km²,其中高温区域约占热岛增加面积的 57.97%;1999—2010 年,热岛面积略有增加,但较高温区域增加明显,而高温和特高温区面积有所减小;2010—2017 年,热岛继续扩大,面积共增加约 108.1 km²,但其中较高温面积增加最多,表明热岛强度已转向较高温。研究区城市热岛比例指数(URI)从 1989 年的 0.199 上升到了 2017 年的 0.337,整体表现为上升的趋势特征。

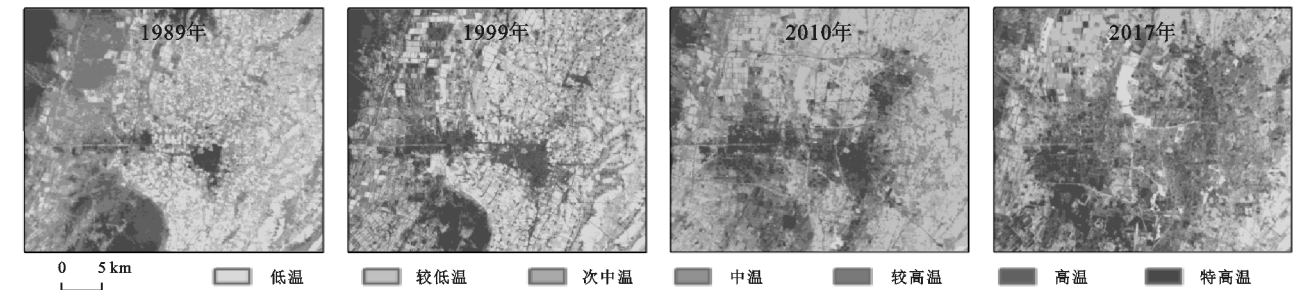


图 1 银川市城区不同年份地表温度分级空间分布

表 1 银川市城区不同时期地表温度等级面积及热岛比例指数

等级	面积/km ²				面积变化/km ²			
	1989 年	1999 年	2010 年	2017 年	1989—1999 年	1999—2010 年	2010—2017 年	1989—2017 年
低温(1)	154.68	157.11	7.35	54.19	2.43	−149.76	46.84	−100.49
较低温(2)	227.56	228.03	259.92	149.63	0.47	31.89	−110.29	−77.94
次中温(3)	233.04	199.08	264.23	203.16	−33.96	65.15	−61.07	−29.88
中温(4)	213.45	171.60	213.78	230.20	−41.85	42.17	16.42	16.74
较高温(5)	126.70	135.91	162.77	229.02	9.21	26.86	66.25	102.32
高温(6)	77.64	119.91	117.15	158.44	42.27	−2.76	41.29	80.80
特高温(7)	60.53	81.96	68.41	68.97	21.43	−13.55	0.56	8.45
URI	0.199	0.258	0.261	0.337				

3.2 热环境动态监测

在地表温度 7 个等级的基础上,对研究区 4 个时期的热环境进行差值变化监测,根据差值结果将热环境变化幅度分为 5 级,即无明显变化、略微升温、明显升温、略微降温 and 明显降温(表 2,图 2)。变化检测结果表明:1989—1999 年,研究区明显升温的面积比例约 1.02%,主要分布在城市建成区;而明显降温区域占研究区面积的 1.28%,主要分布在研究区的北部。1999—2010 年,明显升温面积所占比例有所上升,约占总面积的 3.82%,主要分布在贺兰县、西夏区、金凤区以及兴庆区等城市建成区的扩展区域,明显降温区域仅占研究区面积的 0.84%,主要分布在研究区的西北部。2010—2017 年,明显升温面积所占比例较前一时期有所下降,约占总面积的 2.45%,主要分布在城市建成区周边,而城市建成区的

温度略有下降。28 a 间研究区明显升温和略微升温面积占比分别为 7.38%,47.99%,主要分布在城市建成区;而明显降温和略微降温面积约占研究区的 26.54%,其中明显降温区域比例仅为 1.47%,主要分布在研究区的西北部,总体上热环境呈升温趋势。转移矩阵结果表明(表 3):1989 年由低温、较低温、次中温和中温等级转换为热岛的比例分别为 30.53%,31.14%,36.15%,44.73%,而由较高温、高温和特高温转换为低温和较低温的比例分别为 19.59%,5.9%,4.46%,温度等级上升的幅度和比例显著高于温度下降的幅度和比例,地表温度整体上升。

3.3 剖面热环境对比

为了进一步比较 28 a 来研究区热环境的空间总体变化规律,揭示其热环境的宏观特征,本文从不同

方向做 A,B,C 3 条贯穿整个研究区域的剖面线,分别沿剖面线方向提取 1989 年和 2017 年的地表温度数据,制作 2 个时期 3 条剖面线的地表温度剖面(图 3)。结果显示,1989 年的 A,B,C 剖面线平均地表温度分别为 23.81℃,24.96℃,26.26℃,均低于 2017 年的 34.25℃,34.18℃,34.44℃,增幅分别为 10.44℃,9.22℃,8.18℃,表明 28 a 间研究区热环境发生了较大变化,地表温度整体呈升高趋势,且 A 剖面线方向

地表温度增幅最大。从图中可以看出,1989 年由于城市规模很小,城市建成区周边多为植被覆盖区,因此地表温度相对较低,但建成区地表温度明显高于周边区域,3 条剖面线中出现的明显“高峰区”即为该时期的建成区地表温度;随着城市不断扩展,2017 年城市建成区面积快速增加,使研究区内地表温度明显上升,A,B,C 剖面线中“高峰区”长度也显著增加,且 A 剖面线方向地表温度变化最大。

表 2 银川市城区不同时期热环境面积变化

等级	差值	1989—1999 年		1999—2010 年		2010—2017 年		1989—2017 年	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
明显升温	—6, —5, —4	11.16	1.02	41.80	3.82	26.83	2.45	80.68	7.38
略微升温	—3, —2, —1	413.97	37.85	410.36	37.52	397.94	36.39	524.82	47.99
无明显变化	0	375.50	34.34	304.98	27.89	334.35	30.57	197.86	18.09
略微降温	1, 2, 3	279.00	25.51	327.25	29.92	333.02	30.45	274.22	25.07
明显降温	4, 5, 6	13.98	1.28	9.22	0.84	1.46	0.13	16.03	1.47

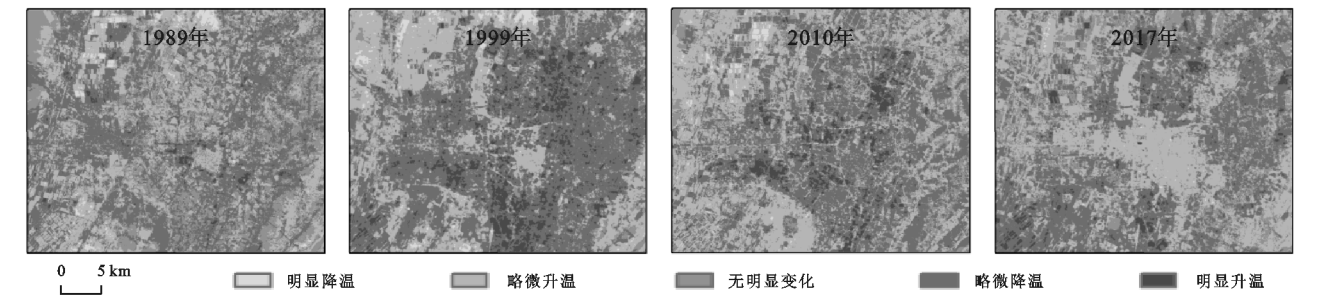


图 2 银川市城区不同时期热环境变化监测

表 3 1989—2017 年银川市城区热环境等级转移矩阵

年份	热环境等级	1989 年						
		低温	较低温	次中温	中温	较高温	高温	特高温
2017 年	低温	12.08	5.09	5.37	3.43	2.80	0.66	0.05
	较低温	16.83	15.41	14.41	12.62	16.79	5.24	4.41
	次中温	19.90	23.30	20.41	17.59	17.58	8.72	8.59
	中温	20.67	25.06	23.66	21.63	16.62	13.68	13.59
	较高温	17.17	19.27	22.00	23.16	18.99	22.34	27.28
	高温	10.84	9.69	11.38	15.43	16.10	24.60	34.11
	特高温	2.52	2.18	2.77	6.14	11.13	24.76	11.96

3.4 土地利用时空分布变化特征

3.4.1 土地利用分布及变化总体特征 由图 4 和表 4 可知,银川市城区最主要的土地利用类型为耕地和城乡工矿居民用地,城乡工矿居民用地分布在区域中部,整体呈东西向展布,耕地则集中分布在城市周边。随着城市化进程的不断加速,28 a 间银川市城区的土地利用空间格局发生了较大变化,各类型土地利用面积绝对变化量为:未利用土地>耕地>城乡工矿居民用地>草地>水域>林地。未利用土地和草地面积逐年减少,而城乡工矿居民用地面积逐年增加且保持较高增长速度,共增加了 236.24 km²;耕地在 1989—1999 年大幅增加,1999 年后有所减小,整体面积增

加;水域在 1989—2010 年面积逐年增加,2010 年之后面积略有减小,总量明显增加;林地面积变化最小,仅增加了 15.12 km²。土地利用转移矩阵结果表明,研究区 28 a 间各土地利用类型相互转换程度整体较为强烈,耕地的增加主要源于草地和未利用土地转入,城乡工矿居民用地的增加主要源于耕地、草地和未利用土地的转入,林地和水域面积变化相对较小,主要由耕地、草地和未利用土地转入,草地和未利用土地主要呈转出状态,面积明显减少。

3.4.2 土地利用对区域热环境贡献度 根据公式(7)计算 4 个年份各土地利用类型对银川市城区热环境的贡献度指数(表 5)。结果表明:28 a 间各土地利用类型

中耕地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地对研究区热环境贡献较大,而草地和林地相对贡献较小;耕地和水域为热环境的汇景观,城乡工矿居民用地和未利用土地则为源景观。随着城市化进程加速,研究区土地利用类型面积变化显著,耕地和未利用土地向城乡工矿居

民用地转化趋势明显,使该类型土地面积迅速增加,空间聚集度增强,建筑面积增加,导致地表温度与区域平均温度差值增加,热环境贡献度指数持续上升,增加了 0.63;水域和未利用土地对区域热环境贡献度呈下降趋势,而耕地对热环境贡献度则呈上升趋势。

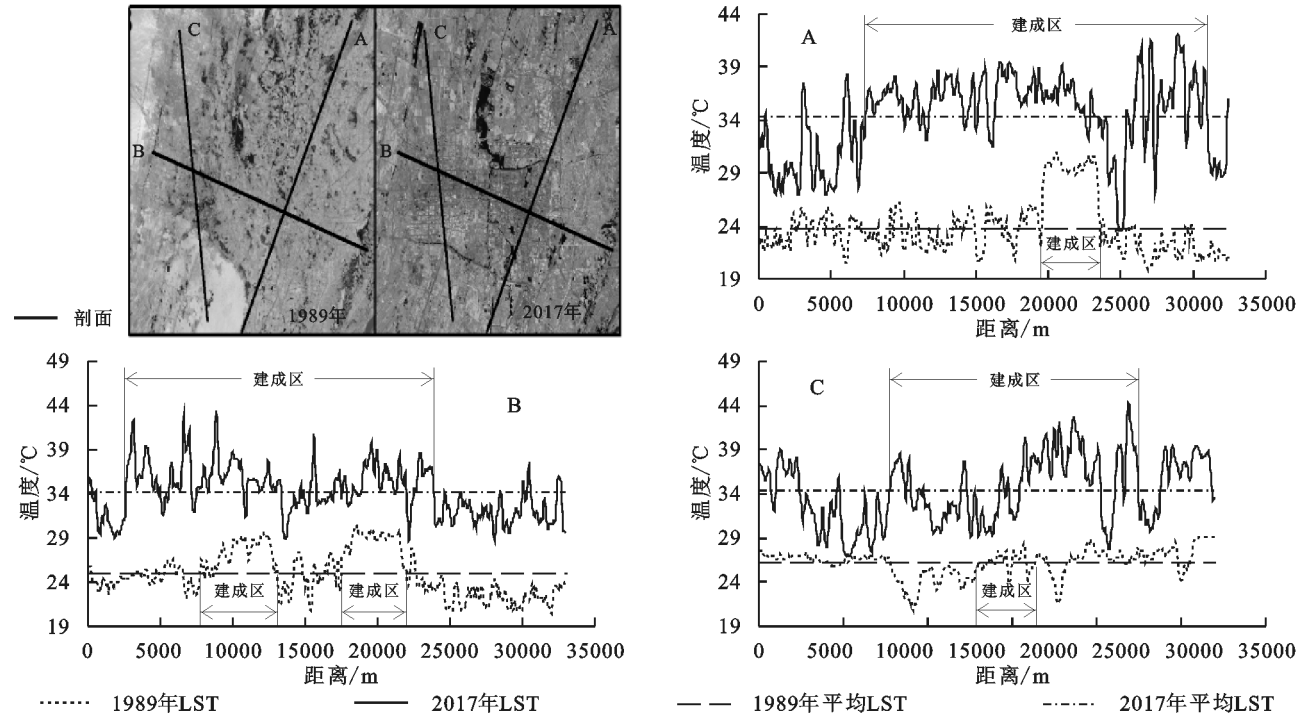


图 3 1989 年和 2017 年不同剖面线方向的地表温度变化

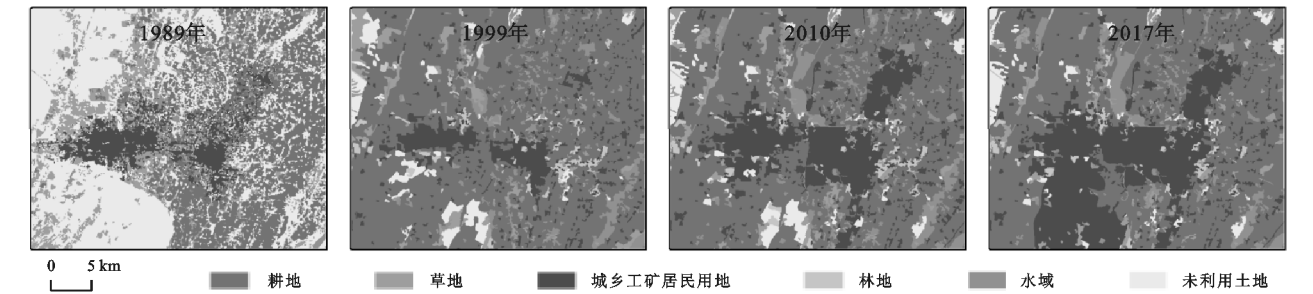


图 4 研究区不同年份土地利用

表 4 研究区土地不同时期土地利用变化		km ²						
土地利用 类型	面积				面积变化			
	1989 年	1999 年	2010 年	2017 年	1989—1999 年	1999—2010 年	2010—2017 年	1989—2017 年
耕地	314.31	774.43	671.45	621.41	460.12	−102.98	−50.04	307.11
林地	5.73	25.85	25.51	20.85	20.12	−0.34	−4.66	15.12
草地	169.89	61.71	47.48	41.21	−108.18	−14.23	−6.27	−128.68
水域	30.85	71.25	86.33	74.58	40.39	15.08	−11.75	43.73
城乡工矿居民用地	65.02	110.63	213.37	301.26	45.61	102.74	87.89	236.24
未利用土地	507.81	49.74	49.46	34.29	−458.07	−0.28	−15.18	−473.52

3.5 植被覆盖度时空分布变化特征

3.5.1 植被覆盖度时空格局变化 基于像元二分模型计算研究区 4 个时期的植被覆盖度,将其按照[0, 0.4),[0.4,0.5),[0.5,0.6),[0.6,0.7),[0.7,1]分为无植被覆盖区(I级)、极低植被覆盖度(II级)、低植被覆盖度

(III级)、中植被覆盖度(IV级)和高植被覆盖度(V级)5 个等级并对各等级面积进行统计(图 5,表 6)。结果表明:研究区植被覆盖度总体表现出东部相对较高、西部较低的特点,覆盖等级较高的植被多分布在城市建成区周边,土地利用类型主要为耕地。1989—1999 年植被退

化,植被覆盖度下降,I级裸地面积比例上升 18.77%,Ⅱ级和 V 级植被面积比例分别下降 13.79%,5.91%;1999—2010 年植被覆盖度增加,植被恢复,I级植被面积比例下降 18.78%,Ⅲ级和Ⅳ级植被面积比例分别上升 7.05%,6.75%;2010—2017 年,植被覆盖度减小,植被退化,Ⅲ级植被面积增加最多,比例上升了 4.98%,V 级植被面积减小最多,比例下降了 3.55%,28 a 间研究区植被

覆盖度较高且整体呈现减小趋势,植被表现为退化—恢复—退化的变化过程。从空间分布上看,1989 年贺兰山山前的极低植被覆盖区逐渐转变为中、高植被覆盖区,土地利用类型由未利用土地转变为耕地,植被增加明显;而由于城市的快速扩展,研究区东部、北部和南部区域植被出现退化,由中高转化为极低和低类型,植被覆盖度降低。

表 5 银川市城区不同时期各土地利用类型热环境贡献度指数

土地利用 类型	1989 年			1999 年			2010 年			2017 年		
	S/%	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	CI	S/%	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	CI	S/%	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	CI	S/%	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	CI
耕地	45.70	-2.53	-1.16	71.12	-1.05	-0.75	61.66	-0.92	-0.57	55.23	-0.98	-0.54
林地	1.84	-0.74	-0.01	2.37	-0.09	0.00	2.34	0.30	0.01	1.91	0.29	0.01
草地	11.00	-0.41	-0.05	5.67	0.44	0.02	4.36	0.72	0.03	3.78	0.83	0.03
水域	4.85	-1.13	-0.05	6.54	-1.97	-0.13	7.93	-1.44	-0.11	8.69	-4.08	-0.35
城乡工矿居民用地	9.18	1.46	0.13	9.73	3.09	0.30	19.17	2.91	0.56	27.24	2.80	0.76
未利用土地	27.42	1.62	0.44	4.57	3.31	0.15	4.54	2.00	0.09	3.15	1.43	0.05

注:S 为各土地利用类型面积所占比例, ΔT 为不同土地利用类型平均温度与区域平均温度的差值,CI 为贡献度指数。

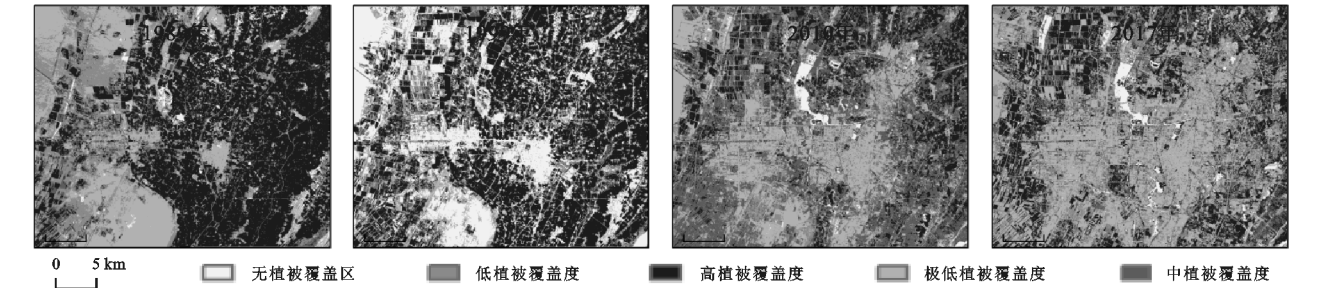


图 5 1989—2017 年银川市城区植被覆盖度空间格局分布

表 6 1989—2017 年银川市城区植被覆盖面积

植被覆盖度 类型	1989 年		1999 年		2010 年		2017 年	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
I 级	16.91	1.55	222.23	20.32	16.87	1.54	25.95	2.37
Ⅱ级	312.55	28.58	161.76	14.79	252.60	23.10	246.43	22.53
Ⅲ级	221.89	20.29	134.02	12.26	211.20	19.31	265.61	24.29
Ⅳ级	155.43	14.21	253.41	23.17	327.20	29.92	308.66	28.22
V 级	386.82	35.37	322.19	29.46	285.74	26.13	246.96	22.58

3.5.2 植被覆盖度与地表温度的关系 将研究区 4 个年份的 LST 和植被覆盖度进行空间叠加分析,并统计不同等级地表温度中各植被覆盖等级的众数(表 7),结果表明:构成热岛的较高温区、高温区和特高温区主要为 I 级、Ⅱ级和Ⅲ级植被,而非热岛区域Ⅳ级和 V 级植被为主;此外,随机生成 789 个采样点(点间距为 500 m),对不同时期的 LST 和植被覆盖度进行相关分析,结果显示其相关系数分别为-0.78,-0.79,-0.70,-0.39,均通过 1% 的显著性检验。由此可见,研究区不同时期的地表温度与植被覆盖度呈负相关关系,在地表温度较高的区域,植被覆盖度较低;而地表温度较低的区域植被覆盖度较高。

表 7 1989—2017 年研究区地表温度与植被覆盖度叠加众数

地表温度	1989 年	1999 年	2010 年	2017 年
低温	V 级	V 级	Ⅱ级	I 级
较低温	V 级	V 级	V 级	V 级
次中温	V 级	V 级	Ⅳ级	V 级
中温	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅲ级
较高温	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
高温	Ⅱ级	I 级	Ⅱ级	Ⅱ级
特高温	Ⅱ级	I 级	Ⅱ级	Ⅱ级

4 结 论

(1) 1989—2017 年,热岛区域面积持续增加,城市热岛比例指数(URI)从 1989 年的 0.199 上升到了

2017年的0.337,整体表现为上升的趋势特征;4个年份的热环境呈现出西部地表温度整体高于东部的特征,且由于城市化进程的不断加速,热岛区域逐渐集中分布于城市建成区。

(2) 28 a间研究区明显升温区域面积占比为7.38%,主要分布在城市建成区;而明显降温区域面积占比仅为1.47%,主要分布在研究区的西北部,总体上热环境呈升温趋势。1989年的A,B,C剖面线平均地表温度均低于2017年,建成区地表温度明显高于周边区域。

(3) 4个年份的未利用土地和草地面积逐年减少,而城乡工矿居民用地面积逐年增加且保持较高增长速度。耕地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地对银川市城区热环境贡献较大,草地和林地相对贡献较小;城乡工矿居民用地和未利用土地为城市热环境的源景观,耕地和水域则为汇景观。

(4) 研究区植被覆盖度总体表现出东部相对较高、西部较低的特点,覆盖等级较高的植被多分布在城市建成区周边,28 a间研究区植被覆盖度较高且整体呈现减小趋势,植被表现为退化—恢复—退化的变化过程,研究区不同时期的地表温度与植被覆盖度呈负相关关系。

(5) 本文选用MODIS地表温度产品进行Landsat地表温度反演精度检验,由于该产品空间分辨率为1 000 m,与TM数据的分辨率相差较大,为低精度验证;此外选用的Landsat数据时间间隔相对较长,对研究结果有一定的影响,需要在以后的研究中充分考虑上述因素并重点改进。

参考文献:

- [1] Chandra S, Sharma D, Dubey S K. Linkage of urban expansion and land surface temperature using geospatial techniques for Jaipur City, India[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018,11(2):11-31.
- [2] Kant Y, Bharath B D, Mallick J, et al. Satellite-based analysis of the role of land use/land cover and vegetation density on surface temperature regime of Delhi, India[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2009,37(2):201-214.
- [3] 岳文泽,徐建华,徐丽华.基于遥感影像的城市土地利用生态环境效应研究[J].*生态学报*,2006,26(5):450-460.
- [4] 张新乐,张树文,李颖,等.城市热环境与土地利用类型格局的相关性分析:以长春市为例[J].*资源科学*,2008,30(10):1564-1570.
- [5] 李瑶.西安都市圈热环境遥感研究[D].兰州:西北师范大学,2015.
- [6] 杨敏,杨贵军,王艳杰,等.北京城市热岛效应时空变化遥感分析[J].*国土资源遥感*,2018,30(3):213-223.
- [7] 匡文慧.城市土地利用/覆盖变化与热环境生态调控研究进展与展望[J].*地理科学*,2018,38(10):1643-1652.
- [8] 王耀斌,赵永华,韩磊,等.西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系[J].*应用生态学报*,2017,28(8):2621-2628.
- [9] 王佳,钱雨果,韩立建,等.基于GWR模型的土地覆盖与地表温度的关系:以京津唐城市群为例[J].*应用生态学报*,2016,27(7):2128-2136.
- [10] 乔治,孙宗耀,孙希华,等.城市热环境风险预测及时空格局分析[J].*生态学报*,2019,39(2):649-659.
- [11] 吕荣芳,王浩,王鹏龙,等.近25 a银川市城市化进程中热力景观格局演变分析[J].*干旱区研究*,2016,33(4):860-868.
- [12] 孙鹏,韩沐汶,白林波,等.基于Landsat TM/ETM的银川市热岛效应时空变化研究[J].*水土保持研究*,2014,21(1):290-293.
- [13] 李粉玲,常庆瑞,刘佳岐,等.基于多纹理和支持向量机的ZY-102C星HR数据分类[J].*武汉大学学报:信息科学版*,2016,41(4):455-461,486.
- [14] 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].*环境学报*,2018,27(7):1313-1322.
- [15] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005,71(6):613-621.
- [16] Barsi J A, Schott J R, Hook S J, et al. Landsat-8 thermal infrared sensor(TIRS) vicarious radiometric calibration[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(11):11607-11626.
- [17] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,90(4):434-440.
- [18] Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(10):9829-9852.
- [19] 徐涵秋,陈本清.不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J].*遥感技术与应用*,2003,18(3):129-133.
- [20] 侯浩然,丁凤,黎勤生.近20年来福州城市热环境变化遥感分析[J].*地球信息科学学报*,2018,20(3):385-395.
- [21] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998,19(8):1533-1543.
- [22] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.基于Landsat影像的宁夏盐池县植被景观格局变化特征[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2018,46(6):75-84.