引文格式：刘宣,韩芳,马霜霜,等. 农林交错带植被覆盖度与地表温度的相关性分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(3): 99-103. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.03.024

# 农林交错带植被覆盖度与地表温度的相关性分析

刘　宣[1]，韩　芳[2*]，马霜霜[1]，王宇宸[3]
（1. 内蒙古自治区赤峰市气象局，内蒙古 赤峰 024000；2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；
3. 内蒙古自治区锡林郭勒盟气象局，内蒙古 锡林郭勒 026000）

**摘　要：**以内蒙古赤峰市喀喇沁旗为研究区，基于2000—2019年8期Landsat影像，利用空间分析、线性回归和空间自相关3种方法，在4类土地覆被上分析植被覆盖度（FVC）与地表温度（LST）的时空变化及其相关性。结果表明：①近19 a来，喀喇沁旗FVC呈西南向东北递减的趋势，而LST空间分布与FVC相反，呈西南低东北高的趋势；②FVC与LST整体表现为负相关，在空间相关性与线性回归中，农田的相关性强于林地，而空间自相关中林地强于农田；③与农田、建筑、草地相比，林地的FVC能有效降低LST，FVC≥0.75时，对LST影响最明显。

**关键词：**农林交错带；FVC；LST；相关分析
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）03-0099-05

# Correlation Analysis Between Fractional Vegetation Coverage and Land Surface Temperature in Agroforestry Ecotone

LIU Xuan[1], HAN Fang[2], MA Shuangshuang[1], WANG Yucheng[3]
(1. Chifeng Meteorological Bureau, Chifeng 024000, China;
2. Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Huhhot 010051, China;
3. Xilingol League Meteorological Bureau, Xilingol League 026000, China)

**Abstract:** Based on the eight Landsat images from 2000 to 2019, we used the spatial analysis, linear regression and spatial autocorrelation methods to analyze the spatio-temporal variation and correlation between fractional vegetation coverage (FVC) and land surface temperature (LST) on four different types of land cover in Harqin Banner, Chifeng, Inner Mongolia. The results show that ①in the past 19 years, the FVC of Harqin Banner decreases from southwest to northeast, on the contrary, the spatial distribution of LST is lower in southwest and higher in northeast. ②There is a negative correlation between FVC and LST. In the spatial correlation and linear regression, the correlation of farmland is stronger than forest, while the spatial autocorrelation of forest is stronger than farmland. ③Compared with farmland, construction land and grass, FVC of forest can effectively reduce LST. When FVC is more than 0.75, it has the most obvious effect on LST.

**Key words:** agroforestry ecotone, FVC, LST, correlation analysis

植被覆盖度（FVC）是衡量区域植被状况的关键指标，多年的植被覆盖变化可明确反映植被状况随时间的变化规律，对水文、生态和全球变化等具有重要意义。FVC的动态变化过程是研究区域生态植被环境变化的重要途径[1]。地表温度（LST）可全面反映地表水热交换过程，是生态环境变化的重要指示因子，其时空分布与区域生态、植被、气候、水文、环境等因素密切相关[2]。随着遥感技术的发展，FVC在LST与植被关系的研究中受到众多学者的青睐[3]。研究表明，LST与FVC的空间分布具有较好的负相关性[4]；但当FVC处于不同水平时，与LST的线性相关性存在差异，FVC能够有效降低LST，FVC较高的下垫面温度较低[5]。

农林交错带是在空间分布和时间演变中出现林地与耕地交叠过渡的地区，生境复杂、物种丰富，更是自然因子和人为干扰相互作用最活跃的生态敏感脆弱区[6]，有必要进行不同类型植被覆盖与LST相关性的定量研究[7]。由于植被能吸收到达地面一半以上的太阳辐射，并能有效降低近地表风速，从而减少土壤水分蒸发带来的温度上升，因此其增减会影响LST的时空变化。LST是下垫面的重要属性之一，受地表土壤水分和FVC的影响，因此研究FVC与LST的时空变化规律是探索地表环境的重要指标之一[8]。张小飞[9]等研

收稿日期：2022-09-26。
项目来源：内蒙古自治区科技计划资助项目（2021GG0392）；内蒙古自治区自然科学基金资助项目（2021MS03069）。
第一作者简介：刘宣（1991—），本科，工程师，研究方向为生态遥感监测，E-mail：liuxuangrace@sina.cn。
通信作者：韩芳（1979—），正高级工程师，主要从事气候变化与生态环境工作，E-mail：hanfang0520@126.com。

究发现FVC与LST呈负相关，且在不同等级的FVC下，二者表现出分段特点；梁珂[10]等分析了城市LST与FVC的空间动态相关性。内蒙古赤峰市喀喇沁旗地处燕山山系的七老图山脉东北麓，大兴安岭东边的低山丘陵边缘，森林茂盛、农田较分散，是明显的生态交错带，具有丰富的生物多样性，是农林交错带的典型代表。为揭示农林交错带FVC与LST的关系，本文以喀喇沁旗为研究区域，选取2000年、2004年、2007年、2010年、2013年、2015年、2017年、2019年的Landsat数据，探索农林交错带FVC与LST的时空变化规律及其之间的关系，为生态交错带生态环境保护、种植结构调整提供参考依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

赤峰市喀喇沁旗位于赤峰市南部，地理范围为41°32′~42°14′N、118°8′~119°18′E；总面积为3 050 km$^2$，海拔为500~1 890 m，有林面积为1 836.7 km$^2$，森林覆盖率达到57.8%，耕地面积为500 km$^2$；属北温带干旱半干旱大陆性季风气候，四季分明；年日照时数为2 700~2 900 h，年平均降水量约为450 mm；旗内西南部多为山区，天然植被较好，中部为黄土丘陵和山麓地带，山峦起伏、坡向多变、冲沟密布、植被较少，东部老哈河畔和锡伯河沿岸为平川地区，土层较厚、水资源较丰富，为旗内主要产粮区。

### 1.2 数据来源与预处理

遥感数据采用从地理空间数据云下载的Landsat5和Landsat 8卫星影像数据，包括2000年9月、2004年7月、2007年9月、2010年8月、2013年9月、2015年8月、2017年9月、2019年6月和2019年9月植被生长期的9景遥感数据。由于2019年数据受云影响较严重，因此选用云量较少的6月和9月的数据拼接而成。对Landsat数据进行辐射定标、大气校正、几何校正和研究区裁剪拼接等，所有影像和数据均使用WGS_1984_UTM_Zone_50N坐标系。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 FVC计算与趋势变化分析

FVC是植被（包含枝、茎、叶）在地面的垂直投影面积占统计区域总面积的百分比[11]。本文采用像元二分模型计算FVC[12]。假设像元只有植被和非植被覆盖地表，则FVC的计算公式为：

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{max} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

式中，NDVI为归一化植被指数；$NDVI_{max}$为NDVI的最大值，即所有像元总数累计数量达到98%的阈值；$NDVI_{soil}$为NDVI的最小值，即所有像元总数累计数量达到2%的阈值。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

式中，NIR为近红外波段；$R$为红光波段。

利用一元线性回归模型分析2000—2019年FVC的变化趋势，线性回归的变化趋势公式为：

$$Slope = \frac{8 \times \sum_i^8 (i \times FVC_i) - \sum_i^8 i \times \sum_i^8 FVC_i}{8 \times \sum_i^8 i^2 - \left(\sum_i^8 i\right)^2} \quad (3)$$

式中，$i$为序列年份；Slope>0表示FVC呈增加趋势，反之，则表示FVC呈减少趋势。

#### 1.3.2 LST计算

本文采用大气校正法反演LST[13]，首先利用经验值法计算地表比辐射率$\varepsilon$，计算公式为：

$$\varepsilon = 0.004\,FVC + 0.986 \quad (4)$$

然后，提取黑体在热红外波段的辐射亮度值$T_\lambda$，计算公式为：

$$T_\lambda = \left[L_\lambda - L_u - \tau(1-\varepsilon)L_d\right] / \varepsilon \times \tau \quad (5)$$

式中，$L_\lambda$为卫星传感器接收到的热红外波段的辐射亮度值；$L_u$、$L_d$分别为大气上行和下行的辐射亮度值；$\tau$为大气在热红外波段的透过率，上述参数均可在NASA提供的网站上获取。

最后，将热辐射强度转换为LST，计算公式为：

$$T_b = K_2 / \ln\left[K_1 / T_\lambda + 1\right] \quad (6)$$

式中，$K_1$和$K_2$为辐射常数。

分析2000—2019年LST的变化趋势与式（3）一致。

#### 1.3.3 相关性分析

为了更好地分析不同土地利用类型下FVC与LST的分布与变化，本文采用武汉大学发布的30 m分辨率中国逐年土地覆被产品（CLCD）[14]，提取数据集中2000—2019年研究区域农田、林地、草地与建筑4种主要土地利用类型数据。

1）利用基于像元的空间相关分析[15]，对2000—2019年喀喇沁旗的FVC与LST进行逐像元相关分析，以反映FVC与LST的相关程度以及相关系数的空间分布情况，计算公式为：

$$r_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(u_i - \bar{u})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_i - \bar{v})^2}} \quad (7)$$

式中，$\bar{u}$、$\bar{v}$分别为两个要素样本的平均值；$r_{uv}$为两个要素之间的相关系数，其值在-1~1之间，$r_{uv}>0$

表示正相关，$r_{uv}<0$ 表示负相关，相关系数绝对值越大，说明该像元处二者相关性越强。

2）利用SPSS 25.0和Origin9.1软件对FVC和LST进行线性回归相关分析和显著性检验。

3）双变量空间自相关分析。分析多个要素间的空间相关性，包括全局空间自相关（Global Moran's I）和局部空间自相关（Local Moran's I）。许多学者在Moran's I指数的基础上进一步拓展了双变量全局自相关和局部自相关，为研究不同变量空间分布的相关性提供了方法[16]，其定义公式为：

$$I_{lu}^{m}=z_{l}^{m}\sum_{n=1}^{v}W_{mn}\times z_{u}^{n} \tag{8}$$

式中，$z_{l}^{m}=\frac{X_{l}^{m}-\bar{X}_{l}}{\sigma_{l}}$；$z_{u}^{n}=\frac{X_{u}^{n}-\bar{X}_{u}}{\sigma_{u}}$；$X_{l}^{m}$ 为空间单元 $m$ 属性 $l$ 的值；$X_{u}^{n}$ 为空间单元 $n$ 属性 $u$ 的值；$\bar{X}_{l}$、$\bar{X}_{u}$ 分别为属性 $l$、$u$ 的平均值；$\sigma_{l}$、$\sigma_{u}$ 分别为属性 $l$、$m$ 的方差。

## 2　研究结果与分析

### 2.1　FVC时空变化

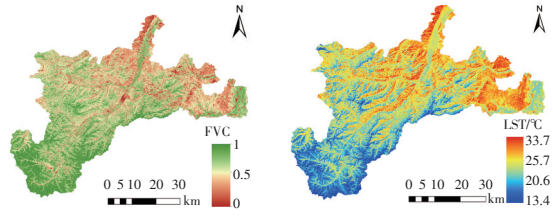
分析2000—2019年喀喇沁旗8个时期的FVC发现，平均FVC在空间上具有较强的分布规律，呈现从西南向东北方向递减、东部低于西部的变化分布趋势，与地形走势相符（图1a）。为反映近19a的植被覆盖情况，将FVC分成5个等级，即低植被覆盖（0~0.2）、中低植被覆盖（0.2~0.4）、中植被覆盖（0.4~0.6）、中高植被覆盖（0.6~0.8）、高植被覆盖（0.8~1），低、中低植被覆盖区主要集中在已收割农田、建筑等区域；中植被覆盖区在西北和中部地区，以黄土丘陵和山麓为主；中高、高植被覆盖区主要在西南部，原始森林覆盖区域；东北部和东部主要是平原，以耕地为主。统计对比不同等级的FVC面积（表1）发现，平均FVC低于0.4的占比为25.96%，在0.4~0.6的为21.76%，高于0.6的为52.28%；FVC低于0.6的区域面积变化趋同，中高和高植被覆盖变化较剧烈，主要在人类的生产生活区和农林交错带；历年平均FVC呈现增减交替特征，在0.473~0.664之间波动。

表1　历年平均FVC不同等级面积统计/km²

| 年份 | 低植被覆盖 | 中低植被覆盖 | 中植被覆盖 | 中高植被覆盖 | 高植被覆盖 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 330.47 | 561.62 | 692.01 | 747.34 | 702.14 |
| 2004 | 203.54 | 355.49 | 539.84 | 765.15 | 1 176.29 |
| 2007 | 446.76 | 698.11 | 643.69 | 557.73 | 694.02 |
| 2010 | 160.50 | 312.95 | 631.87 | 977.86 | 950.40 |
| 2013 | 330.05 | 703.2 | 775.49 | 611.86 | 619.71 |
| 2015 | 222.39 | 377.06 | 582.81 | 735.16 | 1 116.17 |
| 2017 | 298.12 | 302.87 | 496.98 | 744.17 | 1 198.16 |
| 2019 | 409.19 | 597.82 | 924.83 | 676.84 | 431.62 |

### 2.2　LST时空变化

从喀喇沁旗逐年的平均LST来看，近19a平均LST在16.79~31.15℃之间波动变化并缓慢增加，呈现从西南向东北方向递增、东部高于西部的变化分布趋势（图1b）。采用自然间断点分级法对平均LST进行分级发现，低温区（13.4~19.4℃）和次低温区（19.4~22.4℃）占总面积的28.11%，中温区（22.4~24.9℃）占比为27.67%，次高温区（24.9~27.3℃）和高温区（27.3~33.7℃）的占比为44.22%；次高温区和高温区主要集中在东部、东北部和中部等FVC较低的区域，城镇和无植被覆盖区则出现明显高温区域。LST的高低分布与FVC在空间上相反，即FVC值高的区域温度低，反之则温度高。




a FVC　　b LST

图1　2000—2019年喀喇沁旗平均FVC与平均LST空间分布

### 2.3　FVC与LST的相关性分析

许多研究表明，不同土地利用类型对LST演变有很大影响。4种土地利用类型中，近19a林地、建筑、农田和草地的平均LST分别为21.0℃、26.3℃、25.2℃和26.1℃；平均FVC分别为0.79、0.22、0.52和0.45。LST较低的区域，FVC较高；LST较高的区域，FVC较低。由于建筑区域天然生长的植物较少、农田比草地人为干扰因素大且FVC高，因此主要比较林地与农田。

#### 2.3.1　空间分析

对2000—2019年FVC与LST进行逐像元相关分析发现，多年FVC与LST整体上呈负相关关系，均值为-0.109，农田区域出现显著负相关，而林地相关性最低（图2）；西南部与东部部分地区表现出正相关性，该区域多为人工种植林，且丘陵区海拔较高、光热条件好，在较高LST时人为因素给予充足水分，有利于植物光合作用和生长发育。

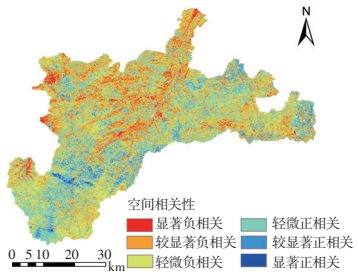



图2 喀喇沁旗多年空间相关性分布图

2.3.2 线性回归分析

本文提取4种土地利用类型的平均FVC与LST，剔除有云区和异常值，生成空间上2 000个要素点对要素点的像元数据，并提取要素点对应像元的FVC和LST，对FVC和LST进行线性回归分析。结果表明，在小于0.01的置信水平上，当FVC为自变量、LST为因变量时，残差平方和均大于10 000；当LST为自变量、FVC为因变量时，残差平方和均小于100，因此本文对LST对FVC的影响进行线性拟合效果最佳。4种土地利用类型的回归系数均小于零，$R^2$系数在0.117~0.589之间，即FVC与LST存在负相关，LST越低、FVC越高。农田的平均$R^2$高于林地，说明农田FVC与LST的拟合相关性略强于林地（表2）。

表2 不同土地利用类型的FVC与LST线性回归系数平均值

| 指标 | 草地 | 建筑 | 农田 | 林地 |
|---|---|---|---|---|
| 回归系数 | −0.042 | −0.056 | −0.057 | −0.033 |
| $R^2$系数 | 0.289 | 0.199 | 0.359 | 0.323 |

2.3.3 空间自相关分析

本文利用GeoDa分析软件建立空间权重矩阵，计算4种土地利用类型的LST与滞后FVC的双变量全局空间自相关Moran's I指数，分析范围内变量的空间聚集程度（表3）。4种土地利用类型的$p$值均为0.001，且$z$值均小于−2.58，因此Moran's I指数通过99%显著性检验水平；各类Moran's I值均小于0，说明LST与FVC存在显著负相关关系。农田的平均Moran's I指数（−0.29）低于林地（−0.308），说明农田的空间负相关性弱于林地，但二者均高于草地和建筑。分别统计不同土地利用类型的FVC与LST平均值发现，FVC中林地最高、建筑最低，农田略高于草地；LST中林地最低，其余3类相差不大，受FVC影响较小；当FVC高于0.75时，降温效果最明显（图3）。统计不同土地利用类型和不同等级FVC要素点数据发现，FVC≥0.75的区域对应的平均LST，农田为23.1℃、林地为21℃，农田比林地高2.1℃；0≤FVC≤0.2的区域对应的平均LST，农田、林地仅相差0.3℃，说明FVC与LST的相互影响较小，拟合较差；0.2≤FVC≤0.4的区域的平均LST，农田比林地高1.3℃。

表3 不同土地利用类型的全局空间自相关Moran's I平均值

| 年份 | 农田 | 林地 | 草地 | 建筑 |
|---|---|---|---|---|
| 2000 | −0.391 | −0.379 | −0.325 | −0.296 |
| 2004 | −0.327 | −0.433 | −0.333 | −0.183 |
| 2007 | −0.36 | −0.117 | −0.024 | −0.154 |
| 2010 | −0.307 | −0.49 | −0.305 | −0.007 |
| 2013 | −0.174 | −0.254 | −0.257 | −0.008 |
| 2015 | −0.383 | −0.435 | −0.451 | −0.121 |
| 2017 | −0.165 | −0.245 | −0.33 | −0.176 |
| 2019 | −0.214 | −0.11 | −0.244 | −0.099 |

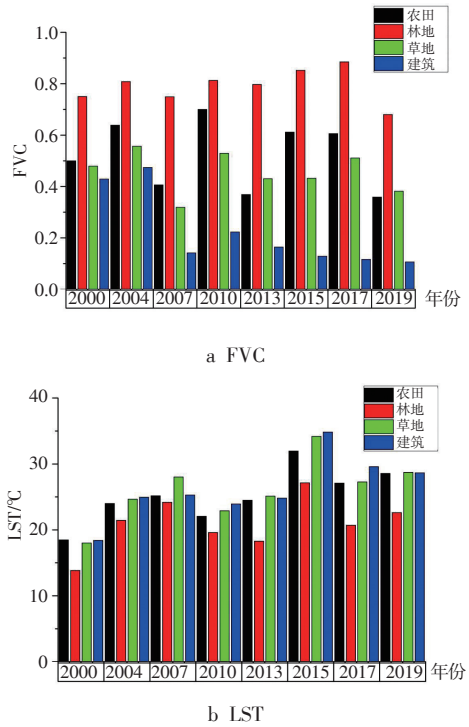



图3 2000—2019年喀喇沁旗不同土地利用类型FVC与LST的时间变化

喀喇沁旗属于典型的农林交错带，建筑面积平均占比不到3%，剩余面积中农田、林地、草地的占比一致，其中林地多为乔木林地，为高植被覆盖，耕地的植被等级为中高植被覆盖。研究表明，喀喇沁旗植被覆盖等级与LST等级呈负相关关系，这与福建省厦门市[17]的研究结论一致，可见无论在气温较低的北方地区还是气温较高的南方地区，LST的降低，均表现为FVC的增加，只是LST降温的幅度不同、FVC变化不同。为说明在同一FVC下不同土地利用类型对LST的降温作用，进一步研究4种土地利用类型的FVC与LST的关系发现，林地对LST的降温效果高于农田、草地，建筑最低，该结论与包瑞清[18]得出的植被有独特的降温空间结构极为接近。因此，为了控制人类活

动的影响、减少城市化进程加快带来的区域温度升高问题，应减少对林地的破坏，加大树木种植，提高森林覆盖率。在空间相关性分析与线性回归分析中，农田的FVC与LST的线性相关性略强于林地；而空间自相关分析中，农田的FVC与LST空间负相关性弱于林地，这或许与空间自相关分析时第二变量FVC是滞后空间要素有关。

全国范围内多地已开展不同土地类型、气候影响因子的植被覆盖研究，但对农林交错带的研究较少，本文可为制定生态保护方案、评估生态质量提供科学依据。受数据质量和植被生长期的影响，2019年植被状况较差，相关系数和斜率与历年相比差异较大，逐年分析对比性较差。另外，气温、降水等气象因子会影响LST的变化，气温过高、降水偏少会导致LST升高，不利于植被生长；且林地区域多为丘陵，农田大多在地势平坦区域，随着海拔的增加，气温逐渐降低，人为因素对植被的干扰减少但生长条件变差，对FVC和LST的变化分析均有影响。后续研究中将进一步探讨水热条件、地形坡向等因子对FVC的敏感性和交互影响。

## 3　结　语

本文基于Landsat数据，对喀喇沁旗的FVC和LST进行了动态分析和线性回归研究。

1）喀喇沁旗的FVC呈现西南向东北递减的空间分布特征。研究区FVC整体变化呈轻微变差状态，低植被覆盖面积呈缓慢增长趋势，其余等级植被覆盖面积均呈波动变化趋势，其中高植被覆盖面积波动最剧烈。喀喇沁旗植被改善面积占比为40.92%，植被退化区面积占比为23.84%，主要是城镇建设区和黄土丘陵冲沟密布的山区。历年林地FVC在时空分布上均高于其他3种土地利用类型，而在FVC≥0.75时，对LST的影响最明显。

2）LST对林地和农田不同年份的影响存在差异，虽然空间自相关分析中林地相关性强于农田、空间相关性分析和线性回归分析中林地相关性弱于农田，但3种分析方法中所有地类的相关性都是负相关的，即随着LST的升高，FVC将减小。FVC与LST的变化幅度林地均大于农田。

## 参考文献


[1] 董佳慧,陈涛,王西平. 康保县1987—2016年植被覆盖度动态变化分析[J]. 地理空间信息,2020,18(2):99-102

[2] 严安,万幼川,张晗. Landsat ETM+数据的武汉市地表温度反演研究[J]. 地理空间信息,2011,9(4):140-142

[3] Jong R D,Bruin S D,Wit A D,et al. Analysis of Monotonic Greening and Browning Trends from Global NDVI Time-series[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 692-702

[4] 杨军军,罗谦,樊云. 西安市植被覆盖度与城市地表温度的关系研究[J]. 地理空间信息,2022,20(1):89-90

[5] 王鹏,王雁鹤,韩小龙,等. 1990—2019年黑河流域植被覆盖度动态变化及气温对其影响[J]. 中国地质调查,2021,8(3):64-71

[6] 吴云,曾源,赵炎,等. 基于MODIS数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1 417-1 424

[7] Voorde T V D,Vlaeminck J,Canters F. Comparing Different Approaches for Mapping Urban Vegetation Cover from Landsat ETM + Data: A Case Study on Brussels[J]. Sensors,2008,8(6):3 880-3 902

[8] 杜跃飞,李轶鲲,刘正军,等. 兰州市2001—2016城区发展与地表温度定量关系研究[J]. 地理空间信息,2018,16(12):84-87

[9] 张小飞,王仰麟,吴健生,等. 城市地域地表温度—植被覆盖定量关系分析:以深圳市为例[J]. 地理研究,2006,25(3):369-377

[10] 梁珂,任秀波,张洋,等. 珠三角城市群城市热岛与地表覆盖时空变化分析[J]. 地理空间信息,2022,20(9):36-40

[11] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003

[12] 孙红,田昕,闫敏,等. 内蒙古大兴安岭根河植被覆盖度动态变化及影响因素的分析[J]. 遥感技术与应用,2018,33(6):1 159-1 169

[13] 朱熹,杨英宝,李小龙,等. Landsat8地表温度反演算法研究[J]. 地理空间信息,2018,16(9):103-106

[14] Yang J,Huang X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13:3 907-3 925

[15] 毛德华,王宗明,宋开山,等. 东北多年冻土区植被NDVI变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学,2011,31(2):283-292

[16] 姚小薇,曾杰,李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. 农业工程学报,2015,31(9):249-256

[17] 高尚,沙晋明,帅晨. 厦门市地表温度与植被覆盖关系定量研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2019,35(2):14-21

[18] 包瑞清. 地表温度与城市空间分布结构的关系及其预测模型[J]. 中国园林,2020,36(10):69-74