

## 杭州村镇下垫面遥感指数与地表温度的相关性

金嘉乐<sup>1</sup>, 孙 剑<sup>2</sup>, 杨利斌<sup>2</sup>, 董程锋<sup>2</sup>, 齐 锋<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 【目的】分析不同类型村镇下垫面特征与地表温度(LST)的相关关系, 对明晰村镇热环境的影响规律具有重要意义。【方法】利用单通道算法反演村镇的下垫面温度, 针对遥感数据不同波段的特性计算了归一化植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)、不透水面信息指数(NDISI)、归一化水汽指数(NDMI)和改进型归一化差异水体指数(MNDWI)。基于杭州市夏、冬两季的地表温度及遥感指数计算结果, 统计分析不同类型村镇下垫面两者间的线性相关性。【结果】地表温度与NDVI呈显著负相关, 与NDBI呈显著正相关, 与NDMI呈显著负相关。NDMI和NDBI对地表温度的影响大于NDVI, NDISI和MNDWI对地表温度的影响则相对更小; 冬季地表温度与遥感指数的相关性弱于夏季。【结论】降低建筑密度, 提高下垫面湿度和植被覆盖度都有利于降低村镇夏季地表温度, 优化村镇热环境。图7表2参27

**关键词:** 景观生态学; 村镇; 地表遥感指数; 地表温度; 相关性

中图分类号: P901 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)03-0563-08

## Correlation between the remote sensing index of the underlying surface and the surface temperature in the villages in Hangzhou

JIN Jiale<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>2</sup>, YANG Libin<sup>2</sup>, DONG Chengfeng<sup>2</sup>, QI Feng<sup>2</sup>

(1. Collage of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;  
2. School of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] In order to figure out how the underlying surface influences the thermal environment of villages and towns, the current study is aimed at a further analysis of the correlation between the characteristics of the underlying surface and the surface temperature of various villages and towns. [Method] First, single-channel algorithm was used to invert the underlying surface temperature of villages and towns. Then, based on the features of different wave bands of remote sensing data, the normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference build-up index(NDBI), normalized difference impervious surface index(NDISI), normalized difference moisture index(NDMI) and modified normalized difference water index(MNDWI) were calculated. Lastly, on the basis of the results of surface temperature and remote sensing index in summer and winter in Hangzhou, a statistic analysis was conducted of the linear correlation between the characteristics of the underlying surface and the surface temperature of different types of villages and towns. [Result] The land surface temperature had a significant negative correlation with NDVI and NDMI; but a significant positive correlation with NDBI. The influence of NDMI and NDBI on surface temperature was greater than that of NDVI index, while the influence of NDISI and MNDWI on surface temperature was relatively weaker. The

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978627); 浙江省自然科学基金资助项目(LY19E080024); 国家大学生创新项目(201910341034); 浙江农林大学大学生创新项目(KX20180142)

作者简介: 金嘉乐, 从事遥感应用与分析研究。E-mail: [1242205012@qq.com](mailto:1242205012@qq.com)。通信作者: 齐锋, 副教授, 博士, 从事绿色植被对人居热环境的调节机理研究。E-mail: [fengqi@zafu.edu.cn](mailto:fengqi@zafu.edu.cn)

correlation between land surface temperature and surface remote sensing index in winter was weaker than in summer. [Conclusion] Reducing the building density, improving the underlying surface humidity and increasing vegetation coverage were all conducive to the reduction of the surface temperature of villages and towns in summer and the optimization of the thermal environment of villages and towns. [Ch, 7 fig. 2 tab. 27 ref.]

**Key words:** landscape ecology; villages and small towns; remote sensing index; land surface temperature; correlation

近年来,由于经济的快速发展,城市人口在不断地增长趋于饱和,乡村振兴战略的实施使得一部分城市人口往乡村转移,为乡村居民创建更好的人居环境是目前的一个趋势。地表温度(LST)是显示人居环境舒适度的一个重要指标,而利用遥感手段可以经济地、宏观地获取地表温度。城镇化也给村镇居住环境带来破坏,人口数量的增加,城镇覆盖面积的扩大,下垫面的破坏,使得热岛效应问题也日益严重<sup>[1-2]</sup>。LAI等<sup>[3]</sup>从昼夜温差出发探究了热岛效应,而HU等<sup>[4]</sup>通过大气剖面分析城市热岛效应问题。研究表明,下垫面上所分布的水体、植被以及建筑都对热岛效应问题有一定的影响<sup>[5-8]</sup>。目前遥感技术在热岛效应问题方面的应用很多,遥感指数由于计算量小等特点被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。利用归一化植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)、不透水面信息指数(NDISI)、归一化水汽指数(NDMI)和改进型归一化差异水体指数(MNDWI)能获得大量地表信息,为分析村镇热环境的主要影响因子奠定基础<sup>[11-18]</sup>。但目前热岛效应仍存在很多问题,村镇领域的热环境研究未受到重视,遥感技术主要应用于大型城市中心或居住小区,在村镇级别上尚未开展。本研究基于单通道算法<sup>[19]</sup>对浙江平原型、山地型、滨水型等3种类型村镇进行地表温度反演的基础上,以杭州市为研究对象,分别提取各村镇相应的5类遥感指数(NDVI、NDBI、NDISI、NDMI和MNDWI),分析不同类型村镇地表温度与遥感指数的相关性,为进一步研究浙江村镇宜居热环境提供技术支撑。

## 1 研究地区与数据来源

### 1.1 研究区概况

杭州( $29^{\circ}11' \sim 30^{\circ}33'N$ ,  $118^{\circ}21' \sim 120^{\circ}30'E$ )是中国东部城市,该研究区地形复杂,西部为浙西丘陵区,有天目山等主干山脉,东部为浙北平原,地势低平,河网密布。杭州属于亚热带季风气候,雨水充沛,四季分明,全年平均气温为 $17.8^{\circ}C$ ,夏季气候炎热湿润,而冬季寒冷干燥。

### 1.2 数据来源

本研究遥感影像来源于美国Landsat 8卫星中OLI\_TIRS数据,夏季成像时间为2016年7月27日,冬季成像时间为2018年2月23日,该遥感影像数据被用来计算遥感指数、亮温和光谱辐射值。此外,本研究还使用了MODIS数据B1级MYD021KM计算大气含水率,成像时间分别为2016年7月25日和2018年2月23日,是一种校正过的1 km分辨率对地观测数据<sup>[20]</sup>。

为研究山地、滨水和平原等不同条件下村镇的情况,在杭州市域范围内随机选取27个村镇,其中大型、中型和小型村镇各有9个。所有村镇遍布杭州市域,空间覆盖面较大,具有较好的代表性。在夏、冬两季,选取相同村镇进行横向比较,分析5大遥感指数对地表温度的影响。

## 2 研究方法

### 2.1 村镇地表温度的获取方法

本研究对已校正的空间分辨率为30 m的Landsat 8遥感影像进行目视判读,分别在夏、冬季节遥感影像上矩形裁剪出27个村镇。由于TIRS11热红外波段定标参数不理想,已提出的劈窗算法误差较大,选用了单通道算法单独利用TIRS10波段来反演地表温度,该算法能够减小反演后的地表温度误差<sup>[21]</sup>。

该过程主要包含3步:首先利用RIS10和RIS11叠加影像文件对选取的村镇进行裁剪,并计算光谱

辐射值和亮温。然后波段叠加 MODIS 数据的 2 波段和 19 波段，并计算大气含水率参数。在重采样之后计算大气水汽含量的参数，最后利用 JIMENEZ-MUNOZ 等<sup>[22]</sup> 的算法反演地表温度。

金点点等<sup>[23]</sup> 将多种算法反演的地表温度与实际温度进行比较，发现基于 Landsat 的单通道算法具有较高的精度，且该方法也在各种应用中得到验证。由表 1 可见：冬季和夏季影像反演的地表温度标准差分别为 0.651 和 1.400 ℃，表明反演的地表温度具有较高的稳定性，该计算方法可靠性高。

## 2.2 村镇地表遥感指数的获取方法

**2.2.1 归一化植被指数 (NDVI)** 根据植被的光谱特性，将卫星可见光和近红外波段进行组合，形成各种植被指数。NDVI 是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子，一般来说，如果 NDVI 大于 0，那么就具有植被，如果 NDVI 大于 0.5，则具有较高的植被覆盖度。其计算公式如下：

$$I_{\text{NDV}} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}。 \quad (1)$$

式(1)中： $I_{\text{NDV}}$  为归一化植被指数； $\rho_{\text{NIR}}$  与  $\rho_{\text{R}}$  分别为近红外波段与红光波段的反射率。

**2.2.2 归一化建筑指数 (NDBI)** NDBI 是由查勇等<sup>[13]</sup> 提出的归一化建筑指数，它能有效地提取城镇用地信息，获得城镇用地分布范围和面积资料。与传统的计算机分类和手工屏幕数字化方法相比，同时具备工作量小和精度高的特点。其计算公式如下：

$$I_{\text{NDBI}} = \frac{\rho_{\text{MIR}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{MIR}} + \rho_{\text{NIR}}}。 \quad (2)$$

式(2)中： $I_{\text{NDBI}}$  为归一化建筑指数； $\rho_{\text{MIR}}$  与  $\rho_{\text{NIR}}$  分别为中红外波段与近红外波段的反射率。

**2.2.3 改进型归一化差异水体指数 (MNDWI)** MNDWI 是基于 MEFETTERS<sup>[14]</sup> 提出的归一化差异水体指数 (NDWI) 修改波长组合所得到的改进型归一化差异水体指数，在提取城镇范围内水体有很好的效果。其计算公式如下：

$$I_{\text{MNDWI}} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}}。 \quad (3)$$

式(3)中： $I_{\text{MNDWI}}$  为归一化差异水体指数； $\rho_{\text{Green}}$  与  $\rho_{\text{MIR}}$  分别为绿光波段和中红外波段的反射率。

**2.2.4 归一化水汽指数 (NDMI)** NDMI 也称归一化差异湿度指数，该指数便于研究地表湿度，为地表湿度与村镇温度的关系研究提供依据。其计算公式如下：

$$I_{\text{NDMI}} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{MIR}}}。 \quad (4)$$

式(4)中： $I_{\text{NDMI}}$  为归一化水汽指数； $\rho_{\text{MIR}}$  与  $\rho_{\text{NIR}}$  分别为中红外波段与近红外波段的反射率。

**2.2.5 不透水面信息指数 (NDISI)** NDISI 的基本原理是在研究不透水面的电磁波谱特征的基础上，寻找不透水面最强和最弱的反射波段，然后利用强反射率热红外波段与弱反射率近红外波段建立指数，达到增强不透水面信息的目的，可以显著区分土壤与不透水面。其计算公式如下：

$$I_{\text{NDISI}} = \frac{\rho_{\text{TIR}} - (\rho_{\text{R}} + \rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{MIR}})/3}{\rho_{\text{TIR}} + (\rho_{\text{R}} + \rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{MIR}})/3}。 \quad (5)$$

式(5)中： $I_{\text{NDISI}}$  为不透水面信息指数； $\rho_{\text{TIR}}$ 、 $\rho_{\text{NIR}}$ 、 $\rho_{\text{MIR}}$  和  $\rho_{\text{R}}$  分别为 TIR10 波段、近红外波段、中红外波段以及红光波段的反射率。

## 3 结果与分析

### 3.1 地表温度与单一遥感指数相关性分析

**3.1.1 NDVI** 如图 1 所示：村镇的地表温度 ( $y$ ) 与 NDVI( $x$ ) 具有较好的拟合优度，属于显著的线性负相关关系 ( $P < 0.05$ )。NDVI 每增加 0.1，地表温度就下降 1.421 ℃，这与南阳市农村居民用地 NDVI 与地表温度<sup>[24]</sup> 的研究结果相一致。可见，增加绿化对优化村镇热环境起到较为显著的作用。

表 1 不同季节地表温度情况统计

Table 1 Surface temperature statistics in different seasons

季节	最低温度/℃	最高温度/℃	平均温度/℃	标准差/℃
冬	13.116	17.141	15.100	0.651
夏	35.502	43.153	38.369	1.400

3.1.2 NDBI 图2显示：村镇地表温度( $y$ )和NDBI( $x$ )具有较好的拟合优度，村镇地表温度与NDBI呈显著正相关关系( $P<0.05$ )，NDBI每上升0.1，地表温度就上升1.302℃。地表温度一定程度上受建筑密度影响，建筑密度越大的地方，地表温度更容易保持高温。建筑主要由钢筋、混凝土等材料建成，密度越高，温度越容易上升，如果建筑的间距过小，那么地表的散热将更加缓慢，温度将保持在高位。建筑密度高让冬季更容易保温，却让夏季不容易降温，保持合理的间距能让人居环境更加舒适。

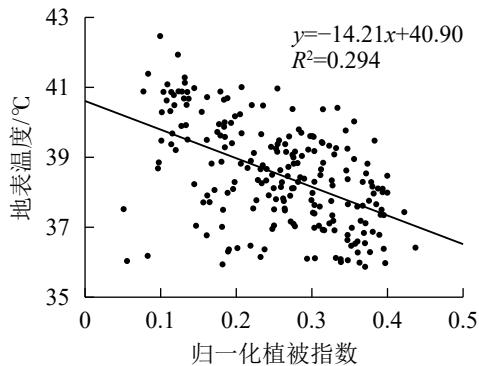


图1 归一化植被指数与地表温度的回归分析

Figure 1 Regression analysis of NDVI and surface temperature

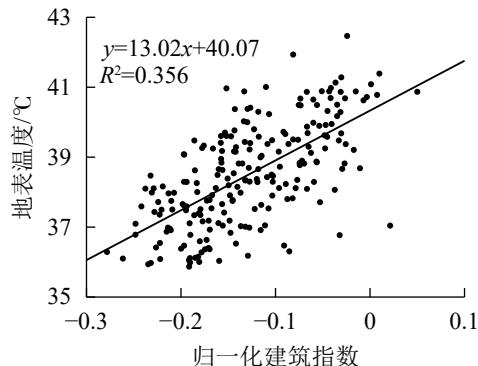


图2 归一化建筑指数与地表温度的回归分析

Figure 2 Regression analysis of NDBI and surface temperature

3.1.3 MNDWI MNDWI与地表温度相关性拟合优度较差，27个村镇的MNDWI与地表温度的负相关性不显著。村镇范围的研究与市域研究的结果不一致<sup>[25]</sup>，村镇内部不包含或较少包含水体，MNDWI主要分布在[-0.2, 0]，MNDWI在此研究区域内无法与地表温度进行较好拟合(图3)。因此，覆盖面积足够的水域才能显著降温。现在城镇中的水体都普遍较少，本身河流湖泊的数量就不是很多，再加上城市建设填埋大量的河流湖泊，缩短河流的宽度，数据展示的正是乡村城市化所处的状态。水体的存在虽然无法让整个村镇降温，但能在小范围内发挥一定作用。

3.1.4 NDMI 由图4可见：地表温度( $y$ )与NDMI( $x$ )具有较好的拟合优度。NDMI对以水泥、柏油为主的城乡居民建设用地具有显著的降温作用，高NDMI使得整片的建设用地地表温度下降，NDMI每上升0.1，地表温度就下降0.891℃。NDMI与地表温度呈显著负相关关系，且这种相关性强于NDVI与地表温度的相关性。夏季炎热，村镇内地表干燥，如果能够改善地表湿度，就能够显著降温。

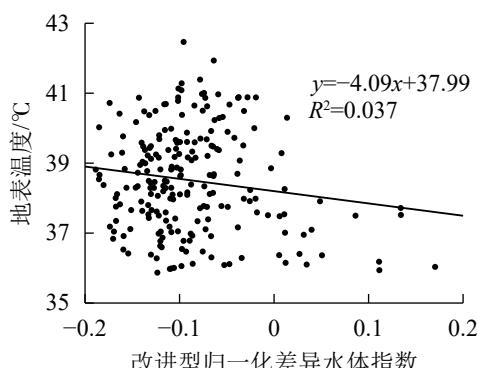


图3 改进型归一化差异水体指数与地表温度的回归分析

Figure 3 Regression analysis of MNDWI and surface temperature

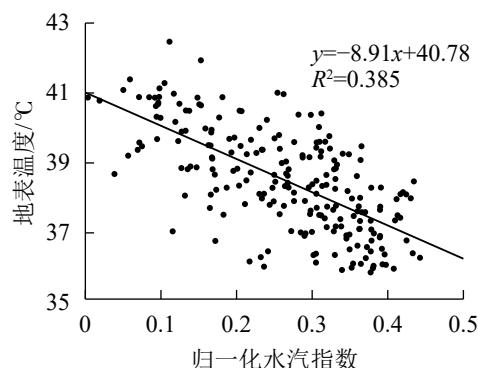


图4 归一化水汽指数与地表温度的回归分析

Figure 4 Regression analysis of NDMI and surface temperature

从反演结果得出湿度是影响地表温度的主要因子，水分的蒸发可以使地面快速降温。但地面的蒸发速度比较快，想要在降雨之后地面的湿度维持在一个水平难度很大。降温快，蒸发也快，水分蒸发之后地表依靠湿度的降温手段就十分有限了。目前从几个方面提供建议：①通过洒水车给地面降温，但这种方法还需要考虑村镇的经济条件。②栽植植物固定土壤中的水分，保持地面湿度。③引入大量的暗渠，保持地面或地下水位，从而保持地面的湿度。

**3.1.5 NDISI** 如图5所示：地表温度( $y$ )与NDISI( $x$ )的拟合效果较差。NDISI的分布较为狭窄，近似矩形，主要集中在[0.35, 0.50]，说明地表温度与NDISI的相关性不显著。村镇与市域的研究范围不同，不透水面的影响效果也有一定区别<sup>[26-27]</sup>。因此，村镇的不透水面对地表温度的影响作用较小，不作为主要的降温手段。

### 3.2 地表温度与多遥感指数相关性分析

针对不同类型的村镇，随机选取了100个样本点，并按上述方法分别提取其地表温度与遥感指数，得到村镇遥感指数与地表温度的皮尔逊相关系数矩阵(表2)。

从表2可见：NDISI在滨水、山地、平原3种地形下的相关系数分别为-0.156、0.053和-0.053，其双尾检验均不显著；MNDWI在滨水、山地、平原3种地形下的相关系数分别为-0.176、-0.063和-0.122，其检验也均不显著。因此，NDISI和MNDWI对地表温度的影响较小。这与上述讨论单地表遥感指数与地表温度的相关性相吻合，NDISI和MNDWI在村镇区域内对地表温度的影响较为微弱。

将NDVI、NDMI和NDBI与滨水、山地和平原地形的相关系数取绝对值。NDVI与滨水、山地和平原的相关系数分别为0.448、0.325和0.438，低于NDMI和NDBI与滨水、山地和平原的相关系数，这也与单地表遥感指数NDVI与地表温度的相关性相吻合。村镇中植被覆盖度高的地方，地表温度相对较低，植被通过蒸腾作用等手段降低地表温度，尤其对降低夏季地表温度具有较强的效果。但是植被对地表的降温需要以自身为媒介，这种降温具有间接性。因此，相对于地面本身的属性，如湿度、建筑密度等，植被对地表降温的能力相对较弱。

单独比较NDMI与NDBI，发现两者都是影响地表温度的重要指标。若要有效地控制地表温度，改变地表湿度和建筑密度是最直接有效的手段。另外，在滨水与山地的状态下，NDMI对地表温度的影响较大，而在平原状态下，NDBI对地表温度的作用明显较强。这种情况需要更多的实验进行相关分析。

从表2还可以发现：山地地形下NDVI、NDMI和NDBI的绝对值分别为0.325、0.375和0.414，均低于平原和滨水的指数。这说明了滨水与平原的地域受到城市化的影响，地表特征开始变得单一，而山地区域的地表情况明显受到更多因素的影响，地表特征更加多样化。

对于村镇建设，为了提升高温下的宜居热环境，首先应该考虑下垫面的湿度、建筑用材以及建筑密度。下垫面湿度的提升能起到一定的降温作用，缓解热岛效应问题；合理的建筑密度则能保持生活空间的合理大小，还有利于通风散热。其次可以在建筑周围种植植物，植物不仅能使建筑降温，还能促进生态环境的循环。虽然村镇中植被覆盖度普遍较低，但有限的植被仍然能够起到显著的降温作用。

### 3.3 地表温度与夏、冬季遥感指数相关性分析

利用夏、冬季影像对研究区域的夏、冬季地表温度进行了反演，并得到图6。图像的东北部主要是杭州城市中心，西南部是杭州城西的山区丘陵地带。从图6可以看出：夏季城市地表温度高的地方主要集中在东北部，处于杭州市的中心，该区域城市热岛效应严重。到了冬季，城市地表温度高的地方由东北方向移动到西南方向，而城市中心却是温度较低的区域。

杭州市中心城市热岛效应严重，冬季地表温度较低，居住环境较差。杭州西南部傍山、靠水，冬暖

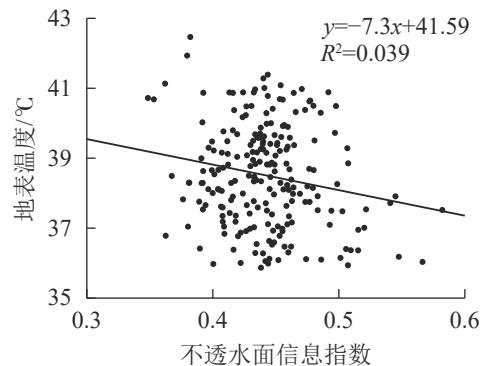


图5 不透水面信息指数与地表温度的回归分析

Figure 5 Regression analysis of NDWI and surface temperature

表2 地表温度与遥感指数的皮尔逊相关系数矩阵

Table 2 Pearson coefficient matrix of surface temperature and remote sensing index

村镇类型	$I_{NDV}$	$I_{NDM}$	$I_{NDI}$	$I_{NDB}$	$I_{MNDW}$
滨水	-0.448**	-0.478**	-0.156	0.496**	-0.176
山地	-0.325**	-0.375**	0.053	0.414**	-0.063
平原	-0.438**	-0.536**	-0.053	0.474**	-0.122

说明：\*\*表示 $P<0.01$ (双尾检验)

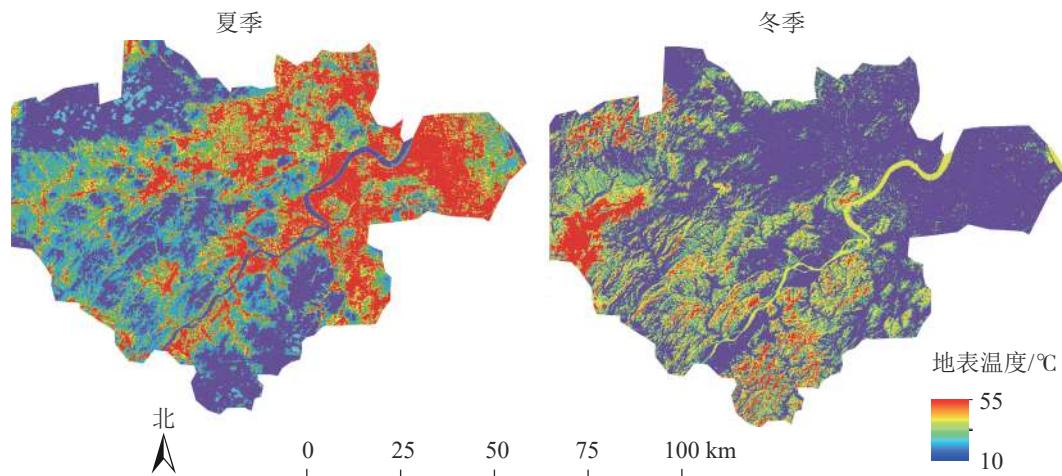


图6 区域夏季、冬季地表温度反演示意图  
Figure 6 Retrieval map of surface temperature in summer and winter

夏凉，是适宜人居的区域。因此，未来杭州市的住宅用地可以往西南方向拓展和开发。

从图7可知：夏季影像的拟合度（图1）优于冬季，夏季影像NDVI与地表温度的线性相关性比冬季更加显著。NDVI主要受绿色植物叶片的影响，当冬季许多植物的叶片掉落后，NDVI的效果将会降低。冬季的地表温度较低，不同地方的地表温度变化较小，几个地表遥感指数在冬季的使用效果均较差。因此，在进行遥感分析时，选取相应季节的影像是需要考虑的一项重要举措。

#### 4 结论

通过研究村镇下垫面遥感指数与地表温度的相关性，得出NDMI、NDBI和NDVI是影响地表温度的关键性指标，它们分别代表了下垫面湿度、建筑密度和植被覆盖度。提升下垫面湿度能起到直接的降温作用，提升高温环境下的热舒适度。保持合理的建筑密度有益于通风散热，可以降低村镇夏季的地表温度。在村镇建筑周围合理栽植绿色植物，可以降低建筑外表面温度，同时也可以降低地表温度，从而提高村镇宜居热环境质量。但村镇区域而言，遥感指数与地表温度的相关性与城市内的相关性存在差异，NDISI和MNDWI所对应的不透水面和小范围水域对村镇范围内的地表起不到明显的降温作用。此外，杭州市中心区域热岛效应最为严重，而杭州西南部无论是夏季，还是冬季，其热岛效应均不明显，且地表温度相对杭州其他区域呈现夏季低、冬季高的特点，具有较好的热环境质量，因此该区域宜作为未来新村镇规划与建设的重点区域。

#### 5 参考文献

- [1] 肖荣波，欧阳志云，张兆明，等. 城市热岛效应监测方法研究进展[J]. 气象, 2005, 31(11): 3 – 6.  
XIAO Rongbo, OUYANG Zhiyun, ZHANG Zhaoming, et al. Advances in methodology of urban heat island [J]. *Meteorol Mon*, 2005, 31(11): 3 – 6.
- [2] 谢苗苗，周伟，王仰麟，等. 城市土地利用的热环境效应研究——以宁波城区为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(5): 815 – 821.  
XIE Miaomiao, ZHOU Wei, WANG Yanglin, et al. Thermal environment effect of land use in urban area: a case study in Ningbo urban area [J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinen*, 2008, 44(5): 815 – 821.
- [3] LAI Jiameng, ZHAN Wenfeng, HUANG Fan, et al. Identification of typical diurnal patterns for clear-sky climatology of

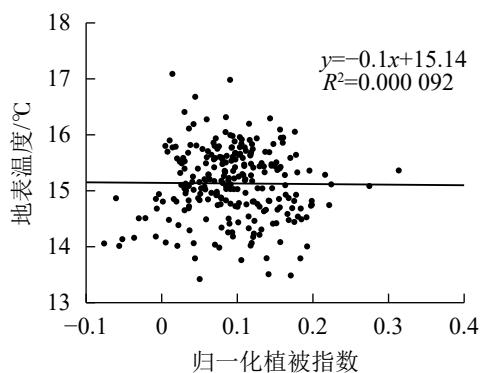


图7 冬季地表温度与归一化植被指数拟合图  
Figure 7 Fitting charts of surface temperature and NDVI in winter

- surface urban heat islands [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2018, **217**: 203–220.
- [4] HU Leiqiu, BRUNSELL N A. A new perspective to assess the urban heat island through remotely sensed atmospheric profiles [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2015, **158**: 393–406.
- [5] 吴昌广, 夏丽丽, 林姚宇, 等. 深圳市典型住区热环境特征及其影响因子分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, **47**(6): 59–62.
- WU Changguang, XIA Lili, LIN Yaoyu, et al. Analysis on characteristics of thermal environments in typical residential districts and its influencing factors in Shenzhen [J]. *J Harbin Inst Technol*, 2015, **47**(6): 59–62.
- [6] 梁保平, 李艺, 刘庆业. 典型植被指数与地表温度空间特征分析——以桂林市为例[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **30**(2): 132–137.
- LIANG Baoping, LI Yi, LIU Qingye. Analysis of spatial characteristics between vegetation index and land surface temperature: a case study in Guilin City [J]. *J Guangxi Norm Univ Nat Sci Ed*, 2012, **30**(2): 132–137.
- [7] 张永永, 刘丽娟, 赵盼盼. 新型水体指数的构建及在滨海湿地水域提取中的有效性验证[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(4): 735–742.
- ZHANG Yongyong, LIU Lijuan, ZHAO Panpan. WZ5 water index and validation of its effectiveness in a coastal wetland water extraction [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(4): 735–742.
- [8] YUAN Fei, BAUER M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2007, **106**(3): 375–386.
- [9] CHEN Xiaoling, ZHAO Hongmei, LI Pingxiang, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2005, **104**(2): 133–146.
- [10] WENG Qihao, LU Dengsheng, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2004, **89**(4): 467–483.
- [11] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 104–129.
- [12] 杨山. 发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例[J]. *地理学报*, 2000, **55**(6): 671–678.
- YANG Shan. On extraction and fractal of urban and rural residential spatial pattern in developed area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(6): 671–678.
- [13] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(1): 37–40.
- ZHA Yong, NI Shaohuang, YANG Shan. An effective approach to automatically extract urban land-use from TM imagery [J]. *J Remote Sensing*, 2003, **7**(1): 37–40.
- [14] MEFETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *Int J Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425–1432.
- [15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(5): 589–595.
- XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *J Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 589–595.
- [16] GAO Bocai. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1996, **58**(3): 257–266.
- [17] WILSON E H, SADER S A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery [J]. *Remote Sensing Environ.*, 2002, **80**(3): 385–396.
- [18] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008(11): 1150–1153, 1211.
- XU Hanqiu. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information [J]. *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2008(11): 1150–1153, 1211.
- [19] JIMENEZ-MUNOZ J C, ROSSELLÓ J C, SOBRINO J, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2009, **47**(1): 339–349.
- [20] 明冬萍, 王群, 杨建宇. 遥感影像空间尺度特性与最佳空间分辨率选择[J]. 遥感学报, 2008, **12**(4): 529–537.
- MING Dongping, WANG Qun, YANG Jianyu. Spatial scale of remote sensing image and selection of optimal spatial resolution [J]. *J Remote Sensing*, 2008, **12**(4): 529–537.
- [21] 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.
- XU Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite [J]. *Chin J*

- Geophys*, 2015, **58**(3): 741 – 747.
- [22] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J, SKOKOVIC D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data [J]. *IEEE Geosci Remote Sensing Lett*, 2014, **10**(10): 1840 – 1843.
- [23] 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.
- JIN Diandian, GONG Zhaoning. Algorithms comparison of land surface temperature retrieval from Landsat series data: a case study in Qiqihar, China [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2018, **33**(5): 830 – 841.
- [24] 戚鹏程, 李启明, 宋松岩. 农村居民地地表温度的遥感反演与分析[J]. 测绘科学, 2013, **38**(6): 67 – 69.
- QI Pengcheng, LI Qiming, SONG Songyan. Remote sensing inversion and analysis of land surface temperature in rural settlements [J]. *Sci Surv Mapp*, 2013, **38**(6): 67 – 69.
- [25] 凌丽媛, 梁保平. 城市地表典型遥感参数与热岛效应时空分析研究——以桂林市为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, **39**(3): 24 – 27, 31.
- LING Liyuan, LIANG Baoping. Spatial-temporal analysis of urban heat island effect and the typical surface parameters variation: case study of Guilin [J]. *Geomatics Spat Inf Technol*, 2016, **39**(3): 24 – 27, 31.
- [26] 葛壮, 李苗. 基于 NDISI 的七台河市不透水面信息提取[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2015, **31**(3): 129 – 131.
- GE Zhuang, LI Miao. Information extracting of the impervious surface in Qitaihe City based on NDISI [J]. *Nat Sci J Harbin Norm Univ*, 2015, **31**(3): 129 – 131.
- [27] 李昕瑜, 杜培军, 阿里木·赛买提. 南京市地表参数变化与热岛效应时空分析[J]. *国土资源遥感*, 2014, **26**(2): 177 – 183.
- LI Xinyu, DU Peijun, Alim Samat. Spatial-temporal analysis of urban heat island effect and surface parameters variation in Nanjing City [J]. *Remote Sensing Land Resour*, 2014, **26**(2): 177 – 183.