

基于高空间分辨率卫星遥感数据的探测环境变化 对气温的影响

陈世涵¹, 李玲¹, 蒋弘凡³, 居伟杰⁴, 张曼玉¹, 刘端阳^{5,6}, 杨元建^{2,7*}

¹南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 江苏 南京, 210044;

²南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京, 210044;

³南京信息工程大学计算机与软件学院, 江苏 南京, 210044;

⁴南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京, 210044;

⁵中国气象局交通气象重点开放实验室, 江苏 南京, 210008;

⁶江苏省气象台, 江苏 南京, 210008;

⁷香港中文大学环境、能源及可持续发展研究所, 香港 沙田, 999077

摘要 以南京市为例,利用陆地卫星和夜间灯光卫星的光学遥感信息并结合地理信息,构建了气象观测站局地(周边 2 km 缓冲区)探测环境表征参数:人为活动影响参数(人口密度和人为热通量)、几何参数(土地利用类型的面积占比和海拔)和物理光学参数(不透水表面面积占比和植被指数),研究了它们对气温观测的影响。结果表明,在相同的天气背景下,当不透水表面面积占比和建成区面积占比减少,植被指数和水体面积占比增加时,气温下降。建立了气象观测站局地的植被指数、不透水表面面积占比和水体面积占比与气温关系的定量回归模型,该模型通过了 99.9% 的置信度检验。所提方法可用于定量评估某一区域高空间分辨率气温的分布。

关键词 遥感; 高分辨率; 陆地卫星 8 号; 光学参数; 不透水表面; 气象探测环境

中图分类号 P412

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1028001

Impact of Observational Environment Change on Air Temperature Based on High-Spatial-Resolution Satellite Remote Sensing Data

Chen Shihan¹, Li Ling¹, Jiang Hongfan³, Ju Weijie⁴, Zhang Manyu¹,

Liu Duanyang^{5,6}, Yang Yuanjian^{2,7*}

¹ School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of
Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

² School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China;

³ School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China;

⁴ School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China;

⁵ Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

⁶ Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

⁷ Institute of Environment, Energy and Sustainability, The Chinese University of Hong Kong,
Shatin, Hong Kong 999077, China

Abstract Taking Nanjing as an example, using the geo-social data combined with optical remote sensing information from the Landsat8 and nighttime light satellites, we design the characterization parameters of the local

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-09-26; 录用日期: 2020-02-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1506502)、国家自然科学基金(41205126)、南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(2019D277)、本科生地球科学类实验课程创新项目(SYCX201818)、人才引进科研启动项目(2018r014)

* E-mail: yyj1985@nuist.edu.cn

detection environment within the 2 km buffer around the observation site, such as the anthropogenic factors (population density and anthropogenic heat flux), geometric parameters (area ratio of land use type and altitude), and physical optical parameters (area ratio of impervious surface and vegetation index), and investigate their impacts on the air temperature (AT) observations. The results indicate that under the same weather background, when the vegetation index and area ratio of water body increase and the area ratio of impervious surface decreases, the AT decreases. The quantitative regression model between the vegetation index, area ratio of impervious surface, and area ratio of water body around the observation site and AT is given, and passes over the 99.9% significance level. The proposed method can be used to quantitatively evaluate the air temperature distribution at some region with high resolution.

Key words remote sensing; high resolution; Landsat8; optical parameters; impervious surface; meteorological observation environment

OCIS codes 010.0280; 280.4788; 280.6780

1 引 言

为了避开各种干扰,保证气象探测设备准确获得气象探测信息,所必需的环境空间即为气象探测环境。近年来,随着城市的快速发展,中国国家级气象站点的周边下垫面发生变化,探测环境被严重破坏,难以满足观测要求,气象观测资料的准确性受到影响。为了改善探测环境,大量站点被迫搬迁至郊区,这使得中国气候资料的均一化问题日益突出^[1-8]。基于修订后的气象观测资料,研究者对中国地区甚至全球的气候变化进行了重新评估,并取得了许多新的认识^[7,9-13]。因此,科学评估城市化对气象探测环境的影响具有重要的科学意义和应用价值。

目前,研究城市化对气象探测环境影响的方法主要分为以下三大类。1) 定点调查方法: 布设高密度的局地小气候观测网络或者高密度的自动气象观测网络,分析城市下垫面空间分布特征与气象要素的关系^[14-17]。2) 遥感监测法: 通过卫星影像、航空影像等遥感资料,研究城市下垫面的地表覆盖类型对气象探测环境和气象观测的影响^[18-26]。3) 模型模拟法: 基于数值模拟,研究城市化引起的观测环境和地表土地利用类型的变化对气象要素的影响^[27-32]。三种研究方法各有利弊: 方法 1) 对自然环境和社会活动等影响较大,且造价和维护成本比较高,不适宜大范围使用。相比之下,卫星遥感技术作为周期性定量观测气象探测环境的有效手段,具有空间分辨率高、范围大、区域动态连续、整体性好等特点,在一定程度上弥补了传统的地面定点观测方法的不足,具有较好的应用前景^[22-26]。因此,基于高空间分辨率卫星光学遥感参数,定量研究气象探测环境变化及其对气温观测的影响,可以减少大量的现场调查,能

有效揭示城市化对气象探测环境及气温的影响途径^[33-34]。

本文以南京市内的 3 个国家气象站和 60 个区域高密度气象站为例,选取 2013 年夏季的高空间分辨率陆地卫星 8 号 Landsat8 影像,基于可见光和热红外波段信息,提出以气象台站周边 2 km 范围内的 4 种土地利用类型(建成区、农田、植被和水体)的面积占比作为表征气象探测环境的几何参数,反演物理光学参数(不透水表面面积占比和植被指数)。结合台站的海拔高度、周边人口密度、人为热通量(AHF)排放等参数,构建气温对上述参数响应的回归模型,从而定量给出气象探测环境变化对气象要素空间分布的影响途径。

2 数据与方法

2.1 数 据

本文所用的高分辨率卫星影像来自于美国陆地卫星计划(Landsat)的第八颗卫星 Landsat8,其上搭载了陆地摄影仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)。OLI的各个波段具体信息及其主要用途如表 1 所示。南京市内 3 个国家气象站和 60 个区域高密度气象站分布如图 1(a)所示,台站位置与数字高程模型(DEM)进行叠加显示。所选用的卫星数据是北京时间 2013 年 8 月 11 日 10 时 37 分过境南京的 Landsat8 影像,OLI 拥有 9 个不同波段的传感器,包括海岸波段(Coastal),蓝光波段(Blue),绿光波段(Green),红光波段(Red),近红外波段(NIR),短波红外 1 波段(SWIR 1),短波红外 2 波段(SWIR 2),全色波段(Pan)和卷云波段(Cirrus)。图 1(b)是由 Landsat8 近红外(NIR)波段(band 5)、红光波段(band 4)和绿光波段(band 3)等三个波段合成的假彩色图。

表 1 OLI 的主要波段范围及用途
Table 1 Main bands of OLI and their usages

Band	Wavelength / μm	Spatial resolution /m	Usage
Band 1 (coastal)	0.433–0.453	30	Coastal monitor
Band 2 (blue)	0.450–0.515	30	Penetration of water body and discrimination of soil and vegetation
Band 3 (green)	0.525–0.600	30	Vegetation identification
Band 4 (red)	0.630–0.680	30	Observing roads, bare soil, vegetation types
Band 5 (NIR)	0.845–0.885	30	Biomass estimation and wet soil identification
Band 6 (SWIR 1)	1.560–1.660	30	Distinguish roads, bare soil, water and fog-cloud
Band 7 (SWIR 2)	2.100–2.300	30	Rock and mineral identification
Band 8 (Pan)	0.500–0.680	15	Resolution enhancement
Band 9 (cirrus)	1.360–1.390	30	Cloud detection

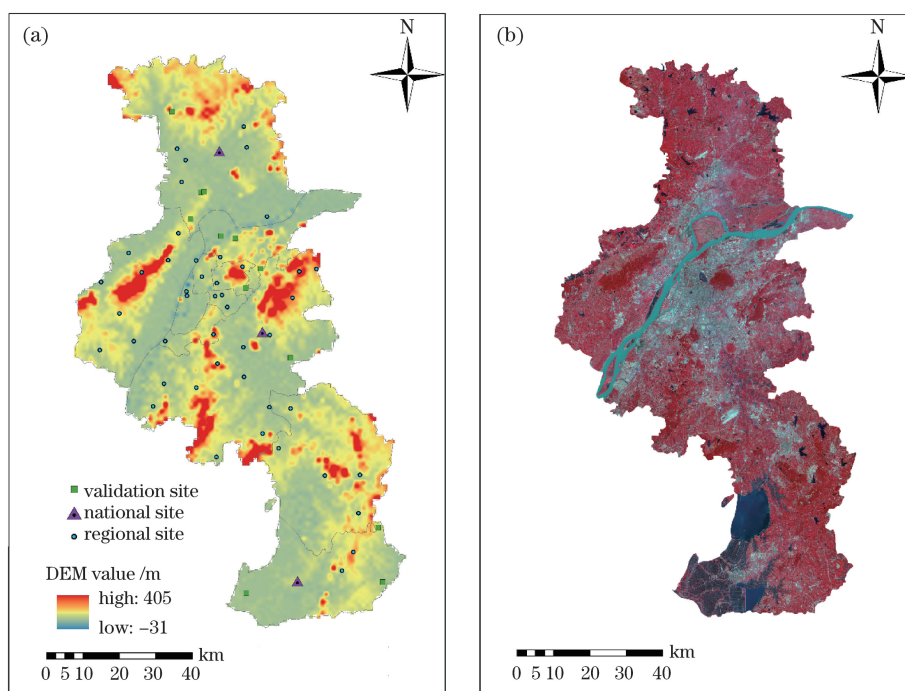


图 1 南京市地图。(a)地理位置、海拔高度及气象站分布图;(b)基于 Landsat8 合成的假彩色图

Fig. 1 Nanjing map. (a) Geographical location, altitude, and station locations; (b) Landsat8-based synthetic false color image

通过中国气象数据共享网,获得 Landsat8 卫星过境南京市 63 个气象站的最近时刻即 11:00 的瞬时气温数据。2013 年夏季,在强势的副热带高压控制下,我国南方出现大范围高温天气和严重的干旱^[35],对当地生产生活产生了严重的影响。此外,人类活动及其产生的人为热对城市热岛贡献也很大^[33],对气象探测的局地热环境的影响不可忽视。选取 2013 年南京市的夜间灯光卫星 DMSP/OLS (空间分辨率为 1000 m)的数据,根据文献^[33]的方法,通过建立行政区内调查人口数和卫星夜间灯光强度的回归关系,进行 2013 年人口空间分布的模拟,如图 2(a)所示,其中 NDVI 为归一化植被指数,NDWI 为归一化水体指数。利用 DMSP/OLS 信息

并结合能源信息,可估算人为热通量,根据文献^[36]的方法,计算得到南京市 2013 年人为热通量的 1 km 分辨率的空间分布,如图 2(b)所示。可见,高的人为热通量和高密度的人口分布吻合较好。

2.2 方法

2.2.1 土地利用分类

根据南京市内的气象站的分布,进行感兴趣区域(ROD)裁剪。已有研究表明,站点周围 2 km 以内的环境可能会对台站的观测资料产生影响^[7,25]。因此,筛选出南京市行政边界范围内的站点后,建立以站点为圆心,2 km 为半径的缓冲区。站点周围探测区域的下垫面类型有森林、农田、城区和水域。基于南京的 Landsat8 遥感数据(表 1),用红色表示近红

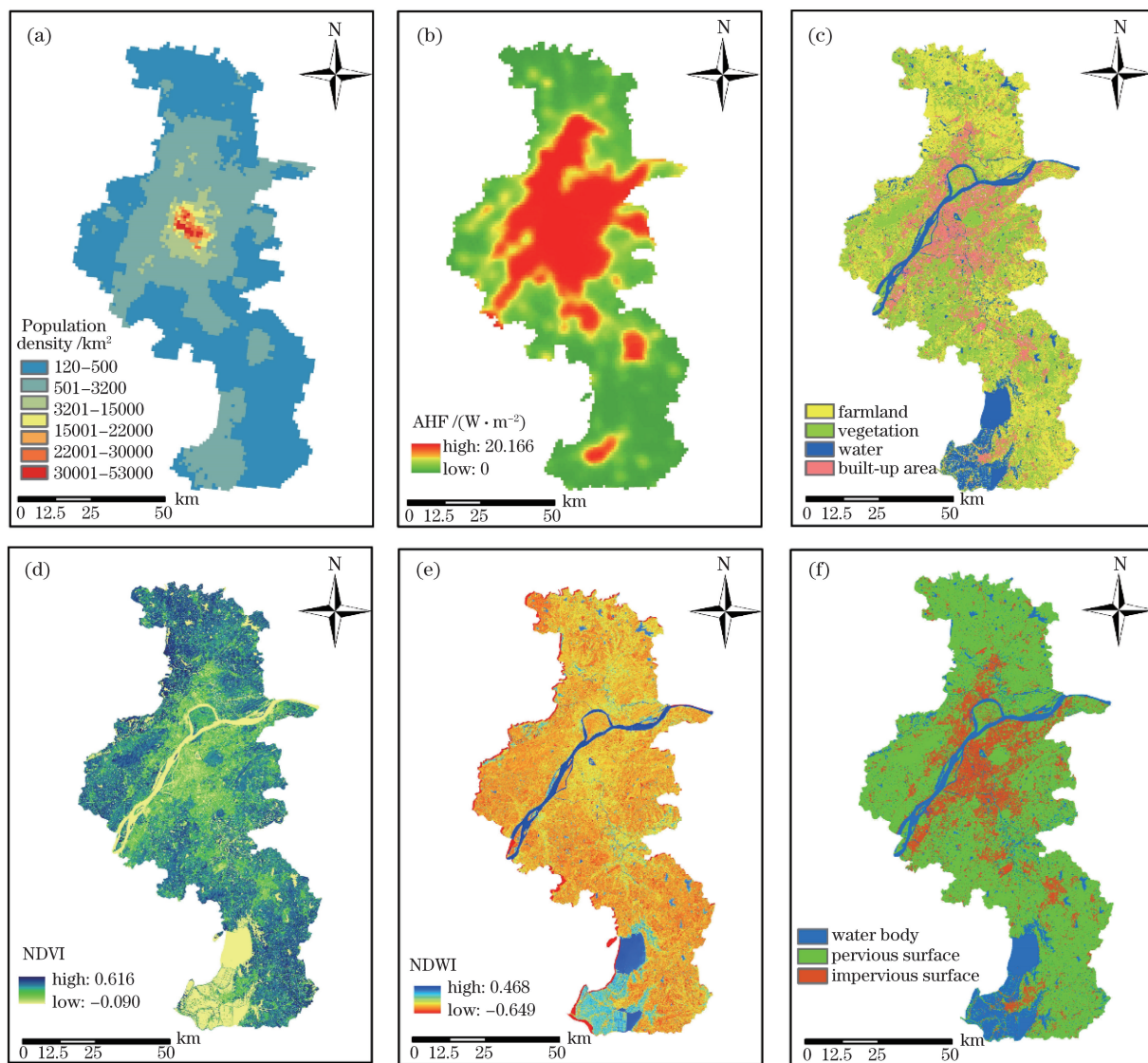


图 2 反演结果。(a)人口分布图;(b)人为热通量分布;(c)主要土地利用类型分布图;
(d)NDVI 分布;(e)NDWI 分布;(f)不透水面分布图

Fig. 2 Retrieval results. (a) Population density distribution; (b) anthropogenic heat flux distribution; (c) main land usage type distribution; (d) NDVI distribution; (e) NDWI distribution; (f) impervious surface distribution

外波段 5, 绿色表示红色光波段 4, 蓝色表示绿色波段 3。利用波段 3、4、5 合成假彩色, 利用波段 6 和 9 的信息进行云检测处理, 并以此为基础进行下垫面分类。采用监督分类和目视解译相结合的方法进行土地利用分类。分类结果如图 2(c) 所示。可以看到, 红色区域为建成区, 与实际相符, 而长江和玄武湖等大面积水体也被较好地显示了出来, 耕地和森林分布在靠郊区的地方, 比较符合南京的实际情况。

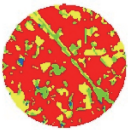

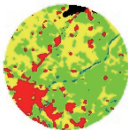

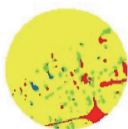

2.2.2 气象站分类

根据已有的研究^[7,22,25], 对所有气象台站与城

市边缘的距离进行了统计, 并基于土地利用信息对台站进行分类。1) 城市站: 在城市区域或近郊内, 2 km 缓冲区内建成区的面积比例大于或等于 50%; 2) 郊区站: 2 km 缓冲区内建成区面积占比为 25%~50%; 3) 乡村站: 距市区较远, 2 km 缓冲区内建成区面积占比小于或等于 25%。表 2 给出了选取的南京市城市站点、郊区站点和乡村站点的实景示例, 并给出了基于 Landsat8 土地利用信息的土地覆盖分类结果。该分类充分考虑了站点周边地物类型差异及其受城市化影响的程度, 可形象直观地表征台站的探测环境变化情况。

表 2 气象台站的环境分类及对应实景(红色表示建成区,蓝色表示水体,绿色表示植被,黄色表示农田)

Table 2 Underlying surface classification and corresponding scene examples(built-up is red, farmland is yellow, vegetation is green, and water is blue)

Site type	Classification map	Real scene
Urban type		
Suburban type		
Rural type		

3 植被指数和不透水表面面积的反演

在下垫面分类的基础上,基于近红外波段和红光波段,反演得到南京市的归一化植被覆盖指数。利用多波段进行南京市的不透水表面(Impervious Surface)的反演和提取。

3.1 NDVI 反演

NDVI 在遥感应用中能很好地反映研究区域内的植被覆盖度,且与气温(AT)和地表温度(SAT)的关系密切^[34-35]。

$$N_{NDVI} = \frac{N_{NIR} - R}{N_{NIR} + R}, \quad (1)$$

式中: N_{NIR} 为OLI第5波段反射率, R 为OLI第4波段反射率。通过(1)式计算并去除有云的部分,得到了南京NDVI的分布(图2(d))。可以看出,高NDVI的地方大多在郊区,其中江北的老山地区因为是丘陵地区,森林覆盖率很高;相比较而言,在高建成区面积占比的市中心和西南部的旱田,NDVI相对较低。

3.2 不透水面积的反演和提取

根据已有研究^[34]可知,根据Landsat8 OLI多波段光谱数据,可计算得到归一化不透水面综合表征指数(NDCI)。首先计算归一化建成区指数(NDBI),土壤修正植被指数(SAVI)和归一化水体指数,再通过这三个指数计算NDCI,最后通过 k -means聚类得到不透水面区域^[34]。具体公式为

$$N_{NDBI} = \frac{S_{SWIR} - N_{NIR}}{S_{SWIR} + N_{NIR}}, \quad (2)$$

式中: N_{NDBI} 为归一化建成区指数; S_{SWIR} 为Landsat 8的短波近红外波段(第6波段)所接收到的辐射强度值;SAVI为

$$S_{SAVI} = \frac{(N_{NIR} - R)(1 + L)}{(N_{NIR} + R + L)}, \quad (3)$$

式中: S_{SAVI} 为土壤修正植被指数;土壤修正因子 L 一般选取0.25,0.50或者1.00,根据文献^[34],当 L 选取0.50时,不透水表面的提取效果最好。

$$N_{NDWI} = \frac{G - S_{SWIR}}{G + S_{SWIR}}, \quad (4)$$

式中: N_{NDWI} 为归一化水体指数; G 是OLI传感器在绿光波段(第3波段)处所接收到的辐射强度值。已有资料^[34]显示,当某一像元的NDWI数值大于0.2时,则认为该像元为永久水体并进行水体掩膜处理。

最后由上述三个指数计算NDCI为

$$N_{NDCI} = \frac{(N_{NDBI} + N_{NDCI})/2 - S_{SAVI}}{(N_{NDBI} + N_{NDWI})/2 + S_{SAVI}}, \quad (5)$$

式中: N_{NDCI} 为归一化不透水面综合表征指数。

由于陆地卫星的分辨率是30 m,因此城市像元通常是由不透水、水体和植被等组成的混合像元。根据文献^[34]的方法,通过模糊聚类和阈值法,将混合像元转换为纯像元,最终得到不透水面的分布(图2(f)),与土地利用分类有很好的对应关系(图2(c))。

4 气温对气象探测环境参数变化的响应模型

地球吸收太阳短波辐射,表面升温,再通过发射长波辐射,表面降温,同时伴随感热过程,具有对大气加热和冷却的功能。特别是在相同的太阳辐射和天气下,在一定的区域范围内,由于不同下垫面的性质不同,气温空间分布也会出现较大差异。由于夏季农作物叶面积较大,根据以上卫星光学遥感反演的定量参数,本文将森林、草地和农田合并为植被覆盖类型。最终在图1(a)中63个气象站为中心的2 km缓冲区内,选取8个气象探测环境的表征参数:平均海拔,NDVI,平均人为热通量,平均人口密度,不透水面积比例以及地表类型(植被、建成区、水体)所占总地表面积的百分比。为了研究每个数据元和气温的关系,使用最小二乘法对气温和8个表征参数进行了线性回归处理,如图3所示,其中 R^2 为决定系数, P 为线性相关概率。

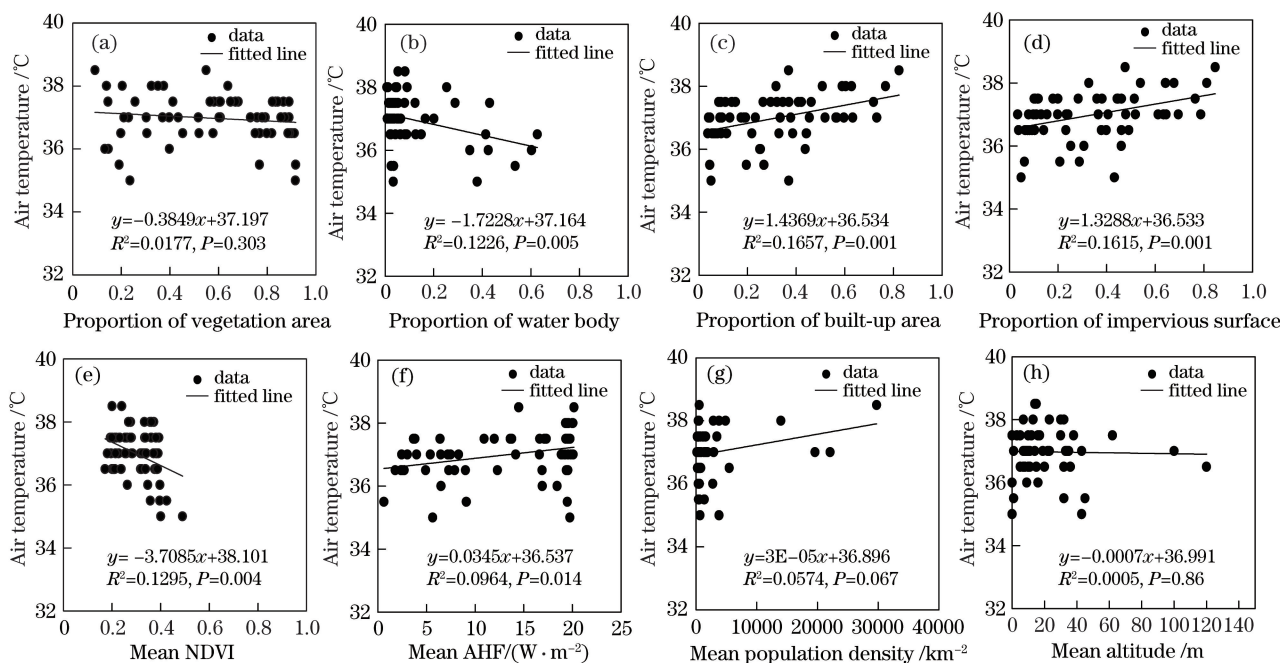


图 3 台站气温和缓冲区表征参数的关系。(a) 植被面积占比;(b) 水体面积占比;(c) 建成区面积占比;
(d) 不透水面积比例;(e) 平均 NDVI;(f) 平均人为热通量;(g) 平均人口密度;(h) 平均海拔高度

Fig. 3 Relationship between surface air temperature and data elements. (a) Proportion of vegetation area; (b) proportion of water body; (c) proportion of built-up area; (d) impervious surface; (e) mean NDVI; (f) mean anthropogenic heat flux; (g) mean population density; (h) mean altitude

可以发现,不透水面积比例和建成区面积比例的分布规律高度一致且和气温呈显著的正相关,如图 3(c)、(d)所示;水体面积比例和 NDVI 与气温均呈显著负相关关系,如图 3(b)、(e)所示,即气温随着台站周边 NDVI 和水体面积比例的提高而下降。主要原因^[7,37-39]如下。1)建成区内主要为建筑物、混凝土、沥青和水泥等,具有很好的导热性和大的热容量,使得白天吸收存储热量而夜间释放热量,加之密集建筑物的多次反射作用,地表温度显著高于郊区,大气容易被加热,形成城市热岛;此外,市区的大量工业、繁忙的交通以及密集的人口等产生的大量人为热也是城区气温高于郊区的主要原因之一,如图 2(b)、(f)、(g)所示。2)NDVI、海拔、植被比例和水体都是和气温呈负相关,这也是符合客观规律^[7,37-39]。在耕地、绿地面积大即植被分布较多的区域,由于大面积的绿色植物可以有效吸收太阳光和水分,加之强烈的蒸腾散热作用,相比其他非植被覆盖(不含水体)的下垫面,当地空气环境温度显著降低。这也是气温和 NDVI 的显著负相关的主要原因。总的来看,NDVI 能较好地反映下垫面的地表植被特征、植被覆盖度、土壤湿度及植被与地表的能量交换

特征,其与地表物理特征参数(反射率、发射率、粗糙度以及热惯量)的变化密切相关^[7,37-39]。此外,水的比热容比较大,水分蒸腾作用带走的潜热大,这些因素都使气温相对较低。值得说明的是,由于南京行政区范围内气象站的海拔落差并不大(图 1(a)),因此气温和台站所在海拔高度呈十分微弱的负相关,如图 3(h)所示。

为了定量构建上述探测环境参数的综合效应与气温变化的关系,选取了 51 个气象站点,利用逐步回归的方法,建立了多元线性回归模型,并随机挑选 12 个站点(4 个城市站点,4 个郊区站点,4 个乡村站点)不参加建模而作为检验使用。最终得到数学关系式为

$$y = 37.897 - 1.794 \times x_1 + 1.349 \times x_2 - 3.786 \times x_3, \quad (6)$$

式中: x_1 为各水体面积占缓冲区总面积的百分比; x_2 为不透水面积占缓冲区面积百分比; x_3 为 NDVI 指数。该回归模型($p = 5 \times 10^{-6}$)通过了 99.9% 的置信度检验。不透水面积比例,水体面积占比和 NDVI 三个变量最终被保留下来,符合前面图 3 的结论:不透水面积比例,水体面积占比和 NDVI 的变化与气温变化最为密切并显著相关。

表 3 气温预测的验证
Table 3 Validation of temperature prediction

Number	Site type	Actual air temperature /°C	Predicted air temperature /°C	Difference /°C	Relative error
1	Urban	38.000	37.401	0.599	0.016
2	Urban	37.000	37.209	-0.209	-0.006
3	Urban	37.000	37.352	-0.352	-0.010
4	Urban	37.500	37.936	-0.436	-0.012
5	Suburban	36.000	36.183	-0.183	-0.005
6	Suburban	37.500	36.085	1.415	0.038
7	Suburban	37.500	36.320	1.180	0.031
8	Suburban	37.000	36.544	0.456	0.012
9	Rural	35.500	34.447	1.053	0.030
10	Rural	37.000	34.520	2.480	0.067
11	Rural	36.500	34.503	1.997	0.055
12	Rural	36.500	35.733	0.767	0.021

利用该模型对随机选出的站点进行检验,结果如表 3 和表 4 所示。可以看出,预测结果比较准确,绝对误差为 $-0.44 \sim 2.48$ °C,相对误差大部分不超过 5%,考虑到现实情况中气温受到云量、相对湿度、风速等局地气象因子的影响,本误差在可接受范围内。根据(6)式,计算模拟得到南京市气温 30 m 分辨率的空间分布特征,如图 4 所示。可以看出,在相同天气背景(副热带高压控制^[35])下,南京市气温呈现出显著的空间差异性。人口密集的中心城区建筑物密集、人为热排放大,气温较高,呈现出明显的城市热岛特征;然而,城区有些区域的植被覆盖度高或水体面积大,其气温则有所降低,城市热岛强度有所减弱。气温从市中心的建成区到郊区呈现逐渐降低的趋势,特别是郊区的农田和森林覆盖区域以及长江和湖泊水面气温显著低于城区的。上述结果很好地反映了局地下垫面环境的变化对南京市的气温分布的影响。在西太平洋副热带高压持续控制下,不透水表面将会大大增加了高温热浪风险,而其他类型特别是水体和植被则可有效减缓高温热浪风险。总的来看,在一定的天气背景下,利用台站周边

表 4 气温预测的平均误差分析

Table 4 Mean error analysis of air temperature prediction

Site type	Predicted average error /°C	Sum of squared errors
Urban site	1.574	2.96
Suburban site	0.717	0.99
Rural site	-0.100	0.18
All sites	0.731	1.35

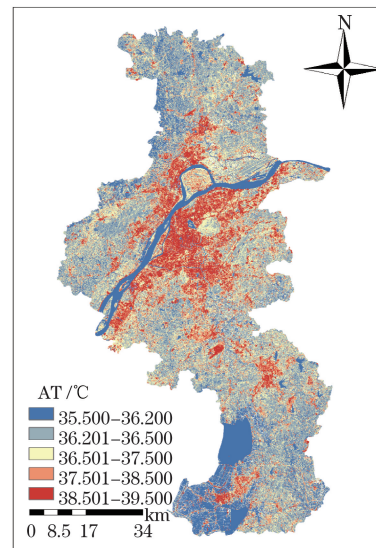


图 4 基于回归模型得到的 30 m 分辨率的南京市气温分布图

Fig. 4 Air temperature distribution in Nanjing at 30 m resolution based on regression model

探测环境的卫星遥感参数,结合站点实测气温,用该回归模型可实现某一区域气温的空间分布变化过程的动态、实时及定量评估。

5 结 论

基于陆地卫星光学遥感信息,结合高密度气象站调查方法,研究了局地尺度(即以观测场为中心的 2 km 缓冲区)地面气象探测环境的变化,构建了表征局地探测环境的人为活动参数(人口密度和人为热通量)、几何参数(建成区、农田、植被和水体等 4 种土地利用类型的面积比例和海拔)和物理光学

参数(不透水表面面积占比和植被指数)。定量给出了平均 NDVI、不透水面积比例、水体面积比例与气温的数学表达关系式,结合稀疏的自动站实测资料,即可实现自动、快速估算高空间分辨率气温对其周边探测环境的空间响应过程。所提方法具有移植性强、可定量直观显示等特点,具有重要的实用价值。所得结论有利于提高对人类活动和区域气候变化关系的理解和认识,对气候变化监测具有重要的科学意义。

影响气温的因素很多,如天气背景(如大气环流、云量等)、人为活动和土地利用等,所提的气温和探测环境的关系模型主要是用于同一气象背景下,适合空间上进行推广应用。对于时间上的推广应用,南京市近几年夏季无云的 Landsat8 遥感影像较少,从而存在统计局限性,后期可能需要借鉴动态的阈值云检测方法^[40-41]进行薄云识别和剔除,以期获得更多的 Landsat 样本数据。后续将利用基于遥感数据的探测环境表征参数,研究随季节、年际变化的气温空间分布预测模型。

参 考 文 献

- [1] Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(2): 260-268.
- [2] Li Q X, Zhang H Z, Liu X N, et al. A mainland China homogenized historical temperature dataset of 1951—2004[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1062-1065.
- [3] Jiang Z H, Huang Q, Li Q X. Study of precipitation series homogeneous adjustment and their correction over China in the last 50 years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1): 67-74.
江志红, 黄群, 李庆祥. 近 50 年中国降水序列均一性检验与订正研究[J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(1): 67-74.
- [4] Ren G Y, Feng G L, Yan Z W. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353.
任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 337-353.
- [5] Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960—2008 based on homogenized observations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(2): 408-420.
- [6] Li Q X. Introduction on the research of homogeneity of climatic data[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 20-23.
- 李庆祥. 气候资料均一性研究导论[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 20-23.
- [7] Yang Y J, Wu B W, Shi C E, et al. Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui Province, China[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(11): 1969-1983.
- [8] Yan Z W, Li Z, Xia J J. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2014, 44(10): 2101-2111.
严中伟, 李珍, 夏江江. 气候序列的均一化: 定量评估气候变化的基础[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2101-2111.
- [9] Li Q X, Yang S, Xu W H, et al. China experiencing the recent warming hiatus[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(3): 889-898.
- [10] Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, et al. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(13): 4384-4392.
- [11] Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, et al. Contribution of urbanization to warming in China[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 706-709.
- [12] Ren G Y, Ding Y H, Tang G L. An overview of mainland China temperature change research [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(1): 3-16.
- [13] Sun X B, Ren G Y, Xu W H, et al. Global land-surface air temperature change based on the new CMA GLSAT data set[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(4): 236-238.
- [14] Shi C E, Wang X R, Wu B W, et al. A study on the summer characteristics of urban heat island in Hefei [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(5): 672-678.
石春娥, 王兴荣, 吴必文, 等. 合肥市夏季热岛特征研究[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(5): 672-678.
- [15] Yang Y J, Zheng Z F, Yim S Y L, et al. PM_{2.5} pollution modulates wintertime urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei megalopolis, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(1): GL084288.
- [16] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [17] Liu W D, Yang P, You H L, et al. Heat island effect and diurnal temperature range in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013,

- 18(2): 171-177.
- 刘伟东, 杨萍, 尤焕苓, 等. 北京地区热岛效应及日较差特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 171-177.
- [18] Shao Q Q, Sun C Y, Liu J Y, et al. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1292-1302.
- 邵全琴, 孙朝阳, 刘纪远, 等. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1292-1302.
- [19] Wang Y Y, Li G C, Zhang Y. Regional representativeness analysis of national reference climatological stations based on MODIS/LST product[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 214-220.
- 王圆圆, 李贵才, 张艳. 利用 MODIS/LST 产品分析基准气候站环境代表性[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2): 214-220.
- [20] Ren G Y, Zhang A Y, Chu Z Y, et al. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(1): 78-85.
- 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 78-85.
- [21] Ren G Y, Li J, Ren Y Y, et al. An integrated procedure to determine a reference station network for evaluating and adjusting urban bias in surface air temperature data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(6): 1248-1266.
- [22] Yang Y J, Shi T, Tang W A, et al. Study of observational environment of meteorological station based remote sensing: Cases in six stations of Anhui Province [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 791-797.
- 杨元建, 石涛, 唐为安, 等. 气象台站环境的卫星遥感调查与评估: 以安徽代表气象站为例[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 791-797.
- [23] Yang Y J, Shi T, Xun S P, et al. Impact of Hefei urbanization on temperature observation based on remote sensing data [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(11): 1423-1430.
- 杨元建, 石涛, 苟尚培, 等. 基于遥感资料研究合肥城市化对气温的影响[J]. 气象, 2011, 37(11): 1423-1430.
- [24] Chen Q Q, Guo J X, Tang Z Y. Development and application of software for identifying construction area from satellite remote sensing images[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(2): 212-216.
- 陈青青, 郭建侠, 汤志亚. 卫星遥感图像人工建筑面积识别软件的开发与应用[J]. 气象科技, 2013, 41(2): 212-216.
- [25] Li Y B, Shi T, Yang Y J, et al. Satellite-based investigation and evaluation of the observational environment of meteorological stations in Anhui Province, China[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(6): 1735-1749.
- [26] Shi T, Huang Y, Wang H, et al. Influence of urbanization on the thermal environment of meteorological station: Satellite-observed evidence [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(1): 7-15.
- [27] Liu S H, Li J, Wen P H. Numerical simulation of atmospheric boundary-layer structure over urban and rural areas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2002, 38(1): 90-97.
- 刘树华, 李洁, 文平辉. 城市及乡村大气边界层结构的数值模拟[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(1): 90-97.
- [28] Liu S H, Zhou B. Simulation of wind, temperature and humidity fields over Beijing area in summer using an improved model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(1): 42-47.
- 刘树华, 周彬. 应用一改进的模式对北京夏季风、温和湿度场的模拟[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(1): 42-47.
- [29] Zhang N, Jiang W M, Wang X Y. A numerical simulation of the effects of urban blocks and buildings on flow characteristics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2002, 20(3): 339-342.
- 张宁, 蒋维楣, 王晓云. 城市街区与建筑物对气流特征影响的数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2002, 20(3): 339-342.
- [30] Tian D X, Guo J X, Guan Y H, et al. Quantitative evaluation on requirement of obstacle distance for wind observation [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(3): 870-880.
- 田东霞, 郭建侠, 关彦华, 等. 风观测对障碍物距离要求的定量评估[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 870-880.
- [31] Xue Z Z, Guo J X, Xue L Y, et al. Quantitative impact assessment of observational environment around Miyun station on wind observation[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(1): 137-144.
- 薛箐箐, 郭建侠, 薛禄宇, 等. 密云气象站探测环境对风观测影响的定量评估[J]. 热带气象学报, 2016, 32(1): 137-144.
- [32] Zhang N, Wang X M, Chen Y, et al. Numerical simulations on influence of urban land cover

- expansion and anthropogenic heat release on urban meteorological environment in Pearl River Delta [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(3/4): 469-479.
- [33] Yang Y J, Gao Z Q, Shi T, et al. Assessment of urban surface thermal environment using MODIS with a population-weighted method: a case study [J]. *Journal of Spatial Science*, 2019, 64(2): 287-300.
- [34] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Assessment of urbanization and urban heat islands in Ho Chi Minh City, Vietnam using Landsat data [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 30: 150-161.
- [35] Sun J, Shi Y Q, Cai M, et al. Analysis on cloud structure forecast and seeding conditions of 3 types of cloud system in South China [J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(11): 1356-1366.
孙晶, 史月琴, 蔡森, 等. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析 [J]. *气象*, 2015, 41(11): 1356-1366.
- [36] Chen B, Shi G Y, Wang B, et al. Estimation of the anthropogenic heat release distribution in China from 1992 to 2009 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(4): 507-515.
- [37] Shi T, Yang Y J, Zhang A M, et al. Study of thermal environment of Hefei City based on TM and GIS [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 156-162.
石涛, 杨元建, 张爱民, 等. 基于 TM 和 GIS 的合肥市热环境研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(2): 156-162.
- [38] Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, et al. The diurnal and seasonal characteristics of urban heat island variation in Beijing city and surrounding areas and impact factors based on remote sensing satellite data [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(z1): 187-194.
张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析 [J]. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(z1): 187-194.
- [39] Wang J, Wan H L, Yao S B. Spatial and temporal response of vegetation cover to climate change in different zones of Sichuan-Shaanxi area during growing season [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5218-5231.
王静, 万红莲, 姚顺波. 生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应 [J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5218-5231.
- [40] Wang Q, Sun L, Wei J, et al. Improvement of universal dynamic threshold cloud detection algorithm and its application in high resolution satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1028002.
王权, 孙林, 韦晶, 等. 动态阈值云检测算法改进及在高分辨率卫星上的应用 [J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1028002.
- [41] Chi Y L, Sun L, Wei J. Improved dynamic threshold cloud detection algorithm for Suomi-NPP visible infrared imaging radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528005.
迟雨蕾, 孙林, 韦晶. Suomi NPP 卫星可见光红外成像辐射仪的改进动态阈值云检测算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0528005.