

# 基于 EOF 的南京气温变化特征及热岛效应研究

王佐鹏<sup>1</sup>,张颖超<sup>1,2</sup>,熊雄<sup>1</sup>,潘霄<sup>1</sup>,陈昕<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学自动化学院,南京 210044;

2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044)

**摘要:**利用经验正交函数分析方法(EOF)对南京市 1961—2016 年地面气温数据进行时空分解,分析南京气温变化特征,并通过城、郊气温差值法分析热岛出现频率、热岛强度及昼夜热岛强度差异。结果表明:南京 1961—1993 年年平均气温在 15.5 °C 上下波动,1993 年以后各区和全市的年平均气温明显上升,其中城市中部增温和气温变化活跃程度远高于周边地区,是热岛中心;从热岛出现的频率以及强度来看,20 世纪 60 年代和 70 年代热岛现象出现频率相对较低,强度也相对较弱,而 80 年代以后各时期热岛出现频率明显较高,并且热岛强度呈明显的上升趋势,其中 2001—2016 年为热岛强度最大时段;对于热岛强度等级而言,目前南京市的热岛等级属于弱热岛,但是中等热岛出现频率逐渐加剧;南京市热岛效应有昼夜差异,具体表现为夜晚热岛略强于白昼。

**关键词:**气温;热岛效应;EOF;昼夜热岛差异;南京

**中图分类号:**P463.3

**文献标识码:**A

城市热岛(urban heat island,UHI)效应,即城市的城区气温高于郊区气温的现象。研究城市热岛效应演变可为城市的可持续发展提供一定的理论指导,为我国城市规划和决策部门提供一定的借鉴<sup>[1]</sup>。国内外有许多学者对不同城市和地区的热岛效应做了很多研究,早在 19 世纪初,Howard(英国人)对伦敦进行的观测研究发现了城区气温比郊区气温高的现象<sup>[2]</sup>。近年来,王娟敏利用卫星遥感技术对西安市城市热岛的空间分布特征以及城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系进行了分析研究<sup>[3]</sup>;李星敏通过对西安市的城市化发展和热岛效应进行研究,发现热岛效应主要成因来自城市化发展<sup>[4]</sup>。南京市是中国的大型城市,2010 年第六次全国人口普查显示,其常住人口已突破 800 万,比 2000 年增长 28.31%,全

市城镇人口所占比例即城镇化率为 78.5%,城市的快速发展对气候变化有着直接而现实的作用<sup>[5]</sup>。利用国家级地面气象数据,对南京市气温数据进行 EOF 模态分解,通过分析后找出城市站点和郊区站,再利用城、郊气温差值法分析南京市的热岛特征。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

研究数据采用南京市 1961—2016 年 6 区的地面气象站 6 h 一次的气温数据(02 时、08 时、14 时、20 时),6 区的站点分别为六合站(站号:58235)、浦口站(站号:58237)、南京站(站号:58238)、江宁站(站号:58333)、高淳站(站号:58339)、溧水站(站号:58340)。这些数据均经过三级质量控制,去除了粗大误差。

**收稿日期:**2018-11-26

**作者简介:**王佐鹏(1994—),男,汉族,江苏盐城人,硕士研究生在读,研究方向为数据质量控制。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41675156);南京信息工程大学人才启动经费项目(2243141701053)

[12] 王建恒. 河北省雷电灾害分布特征及风险区划研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.

[13] 吴安坤. 贵州省雷电灾害风险评价与区划研究[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(2):88-93.

## 1.2 方法

经验正交函数分析方法(empirical orthogonal function, EOF),是一种提取数据主要特征的方法,现已广泛用于气象学研究之中<sup>[6]</sup>。EOF 将时空数据分解为空间模态(EOF)和其对应的时间系数(PC)。为了保证各模态之间相互独立,利用 North 检验计算特征值误差范围来进行显著性检验,特征值的误差范围

$$e_i = \lambda_i \left( \frac{2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$N$  为样本的数量; $\lambda_i$  为第  $i$  个特征值,当相邻的特征值满足  $\lambda_{i+1} - \lambda_i \geq e_i$  时,则表明通过显著性检验,两个特征值对应的模态是有价值的。

城市热岛强度定义为城市站点平均气温减去郊区站平均气温的差值<sup>[7]</sup>(城、郊气温差值

$$T_u = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j, \quad (2)$$

其中  $m$  为城市站数,  $n$  为郊区站数。

## 2 平均气温年际变化

根据 IPCC 第五次评估报告,近 130 年(1880—2012)来全球平均气温升高了  $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[8]</sup>。在全球变暖的大背景下,有必要分析南京年平均气温年际变化特征。首先利用 6 h 一次的气温数据计算 1961—2016 年南京市 6 站的年均气温。各站 56 a 的年平均气温变化见图 1,由图 1 可看出,1961—1993 年南京 6 站年平均气温在  $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$  上下波动,1993 年以后各区和全市的年平均气温都有了明显的上升,1994—2016 年全市年平均气温上升约  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,说明南京市在这 23 a 里明显变暖。

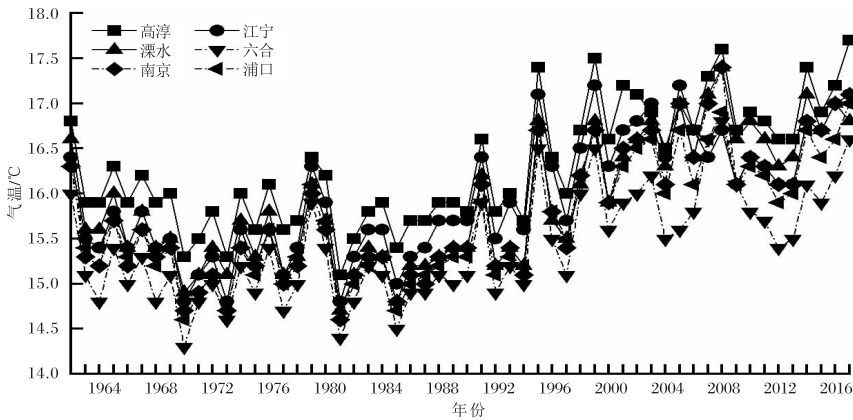


图 1 1961—2016 年南京市 6 站年平均气温变化

## 3 年均气温距平的 EOF 模态分解

### 3.1 EOF 空间分布特征

对南京市 1961—2016 年 6 站年均气温的距平数据进行 EOF 模态分解,并利用 North 显著性检验对其特征值进行检验,寻找有价值的空间场模态。如表 1 所示,前三个特征向量的特征值的累积贡献率超过 99%,但是只有前两个特征值的误差范围没有重叠,因此只有前两个特征值通过 North 显著检验,且累积贡献率超过 98%。这两个特征值可以很好地描述南京市 1961—2016 年气温的两种分布类型。

EOF 第一模态的方差贡献率超过 96%,远高于其它模态,该空间场为南京市的气温场的主要分布类型,其空间分布如图 2a(见第 33 页)所示。

表 1 1961—2016 年南京市年平均气温经过 EOF 分解的前三个模态方差贡献率和误差范围

模态	特征值	方差贡献率/%	特征值误差范围
1	2.567	96.6	(1.084, 4.049)
2	0.039	1.5	(0.016, 0.063)
3	0.029	1.0	(0.012, 0.046)

由图 2a 可见南京全市的特征值均为正值,这表明 1961—2016 年间全市的温度变化趋势整体是一致的,即全市呈要么整体偏高,要么整体偏低的气温分布特点。高值中心在市中心,低值中心在六合区的最北部,表明南京市中心区域气温变化活跃程度远高于周边地区。EOF 第二模态的方差贡献率超过 1.6%,也是南京市气温场分布的一

个较为典型的类型,其空间分布如

征值负值中心处于江宁接近市中心部分,正值分布在南北两端,溧水区为正值中心,呈现中部(南京站、江宁站)和南北两端(溧水站、六合站)反向的分布模式。

### 3.2 EOF 时间分布特征

各个模态分解得到的时间系数代表其对应模态的时间变化特征,其正负代表模态的方向,正号表示与该模态同向,负号表示与该模态异向,其绝对值越大,这种模态越典型。从 EOF 第一模态所对应的时间系数(图 3)可以看出:1994 年之前绝大部分年份的时间系数为负值,因此可以得出 1961—1993 年南京全市处于气温偏低状态;1994 年以后,时间系数开始上升,并几乎全部为正值,说明在 1994—2016 年气温属于气温偏高状态。纵观 56 a,南京全市气温在 1994—2016 年有明显的升温趋势。从 EOF 第二模态的时间系数看:1961—1980 年时间系数为下降趋势,但是几乎均为正值,这段时间里中部地区的气温低于南北两端的气温;1981—2005 年 EOF 第二模态时间系数呈现下降趋势,整体为负值,反应在此期间中部气温高于南北两端气温;2006—2013 年 EOF 第二模态时间系数尽管呈现下降趋势,但是均为正值,说明在此期间城市中部气温低于南北两端气温;2014—2016 年 EOF 第二模态的时间系数为负值并呈下降趋势,此期间中部气温再次高于南北两端。

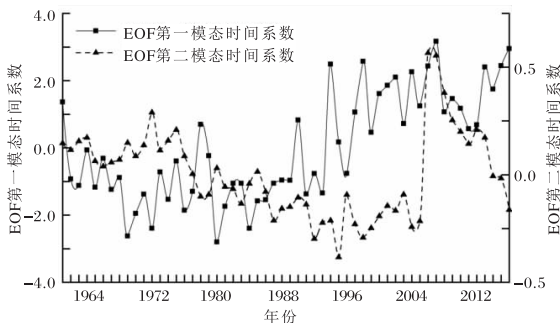


图 3 南京 1961—2016 年气温 EOF 第一、第二模态时间系数年际变化曲线

综合 EOF 第一、第二模态及其各自的时间系数,南京全市的年均气温在 20 世纪 90 年代快速升高。根据 EOF 模态分解得到的空间场和时间

快于南京的其他地区,因此,可以认为南京站和江宁站是南京市的热岛站点。

### 4 热岛强度分析

根据以往作者的研究,城市热岛中心气温与同时间、同高度城市郊区的气温差值  $T_u$  表示热岛强度,并且将城市热岛强度的等级分为无、弱、中等、强和极强五个等级(温差分别为  $T_u \leq 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u \leq 1.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $1.5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u \leq 2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $2.5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u \leq 3.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_u > 3.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ )<sup>[9]</sup>。

为了进一步研究南京 1961—2016 年热岛强度和出现热岛效应的频率,从上文的 EOF 分解结果可知南京站和江宁站属于热岛中心,因此将这两个站作为城区站。由于高淳站相距城区大约 70 km,远远超过其他郊区站与城区站的距离,甚至达到浦口站与城区站距离的 3 倍,因此郊区站只选择浦口、六合、溧水 3 个站点。利用城区站、郊区站气温差值法分别计算 1961—2016 年每天 4 个时刻(02 时、08 时、14 时、20 时)的  $T_u$ 。定义:一天中只要有一个时刻的  $T_u$  大于  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,则表示这一天有热岛现象,计为一个热岛日。为此分时段统计出现热岛日数并计算热岛日出现的频率<sup>[10]</sup>,再计算这些热岛日气温差值的平均值,即为平均热岛强度。统计结果见表 2。从表 2 可看出:20 世纪 60—70 年代出现热岛现象的频率低于 50%,平均热岛强度小于  $0.94 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;20 世纪 80 年代到进入 21 世纪后,各时期热岛日出现频率高于 50%,平均热岛强度均在  $0.94 \text{ } ^\circ\text{C}$  以上,且随着时段推移,逐渐增高,在 2001—2016 年达最高值  $0.980 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

表 2 1961—2016 年南京热岛出现频率及平均热岛强度

时段	热岛日数/d	热岛日出现频率/%	平均热岛强度/ $^\circ\text{C}$
1961—1970 年	1 715	46.99	0.934
1971—1980 年	1 640	44.93	0.913
1981—1990 年	2 186	59.89	0.940
1991—2000 年	2 430	66.58	0.965
2001—2016 年	3 490	59.76	0.980

为了进一步研究南京热岛强度的强弱,统计

热岛日的热岛强度等级。若一天内的热岛强度,则选取最高的热岛强度等级作为当日热岛强度等级,结果如表 3 所示。从表 3 可看出:对于任何时段而言,弱热岛强度出现频率均为最大,说明目前南京市属于弱热岛阶段;但是随着时间推移,其频率总体上在减小。中等热岛出现频率在增大,特别是进入 20 世纪 80 年代以后,这也是 80 年代以后平均热岛强度均高于 60—70 年代的主要原因。南京强热岛、极强热岛出现频率较小,且变化不明显。

表 3 1961—2016 年南京热岛强度等级出现频率 %

时段	弱	中等	强	极强
1961—1970 年	90.38	8.57	0.99	0.06
1971—1980 年	91.89	6.89	0.91	0.30
1981—1990 年	89.98	9.38	0.50	0.14
1991—2000 年	87.16	11.93	0.82	0.08
2001—2016 年	83.84	14.44	1.43	0.29

为了进一步探究白天和夜晚热岛强度的变化,将热岛强度最强的时期(1991—2016 年)每天 02 时和 20 时的热岛强度求平均作为夜平均热岛强度,08 时和 14 时的热岛强度求平均作为昼平均热岛强度,将夜平均热岛强度减去昼平均热岛强度求夜、昼热岛强度差值。图 4 为夜间和昼间热岛强度及夜、昼热岛强度差值的年际变化曲线。从图 4 可见,南京市的夜热岛强度略强于昼热岛强度,在 2011 年出现夜、昼热岛强度差值的峰值,

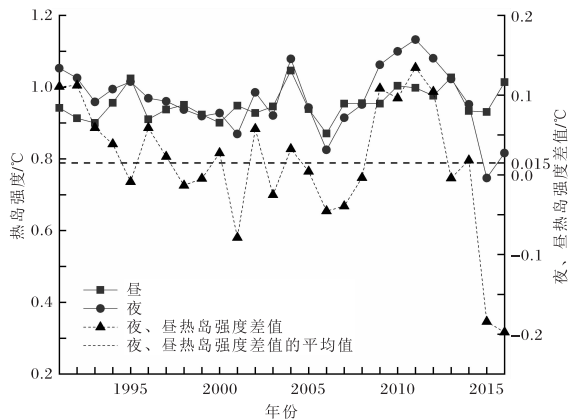


图 4 1991—2016 年南京夜、昼热岛强度及夜、昼热岛强度差值曲线

显的时间变化特征规律,1991—2016 年夜、昼热岛强度差值的平均值为 0.015 °C。

### 5 结论

基于南京市 1961—2016 年 6 区的地面气温资料,利用经验正交函数分解以及城、郊气温差值法对南京气温变化特征及热岛效应进行分析,得到以下结论。

(1)1961—2016 年南京 6 区的年平均气温变化基本一致,总体呈上升趋势。其中 1961—1993 年年平均气温在 15.5 °C 上下波动,1993 年以后各区和全市升温趋势明显;通过 EOF 第二模态分解,发现主城区为热岛中心,增温和气温变化活跃程度远高于周边地区。

(2)20 世纪 60 年代和 70 年代热岛现象出现频率相对较低,强度也较弱;而 80 年代以后各时期热岛出现频率明显增大,且热岛强度呈明显的上升趋势,其中 2001—2016 年间为热岛强度最高时期。

(3)目前南京市的热岛主要为弱热岛强度,但是中等热岛出现频率逐渐加剧;尽管南京市热岛效应有昼夜差异,但是并不明显,具体表现为夜晚热岛略强于白昼。

### 参考文献:

- [1] 杨英宝, 江南. 近 50 a 南京市气温和热岛效应变化特征[J]. 气象科学, 2009, 29(1): 88-91.
- [2] HOWARD L. The climate of London; deduced from meteorological observations, made at different Places in the neighbourhood of the metropolis(2 vol)[M]. London: WPhillips, George Yard, 1818:20.
- [3] 王娟敏, 孙娴, 毛明策, 等. 西安市城市热岛效应卫星遥感分析[J]. 陕西气象, 2011(3):23-25.
- [4] 李星敏, 白爱娟. 西安市气候变化与城市发展[J]. 陕西气象, 1998(5):23-26.
- [5] 刘寿东, 姜润, 王成刚, 等. 南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析[J]. 大气科学学报, 2014, 37(1):19-27.
- [6] 郝振华, 余锦华. 中国东部地区春季降水与气温异常型的联合 EOF 分析[J]. 资源科学, 2013, 35(9):1898-1907.
- [7] 张文静, 吴素良, 郝丽. 西安城市热岛效应变化特

征分析[J]. 陕西气象, 2019(1):2

- [8] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [9] 周明煜, 曲绍厚, 李玉英, 等. 北京地区热岛和热

- [10] 葛荣凤, 张力小, 王京丽, 等. 城市热岛效应的多尺度变化特征及其周期分析—以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 52(2): 210-215.

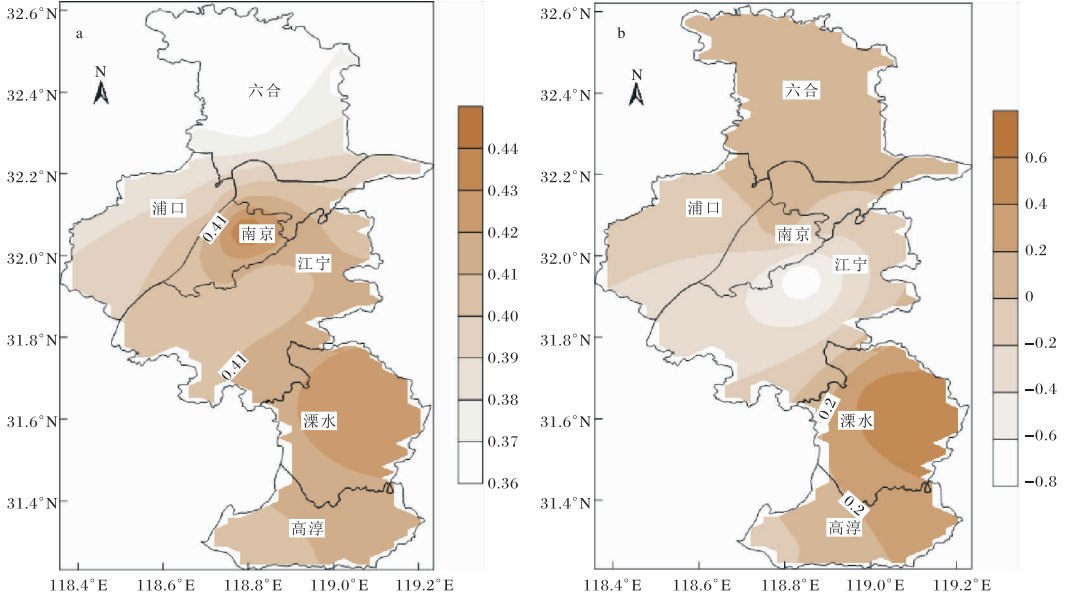


图 2 南京 1961—2016 年气温 EOF 第一模态(a)和第二模态(b)空间场(文见第 30 页 3.1)

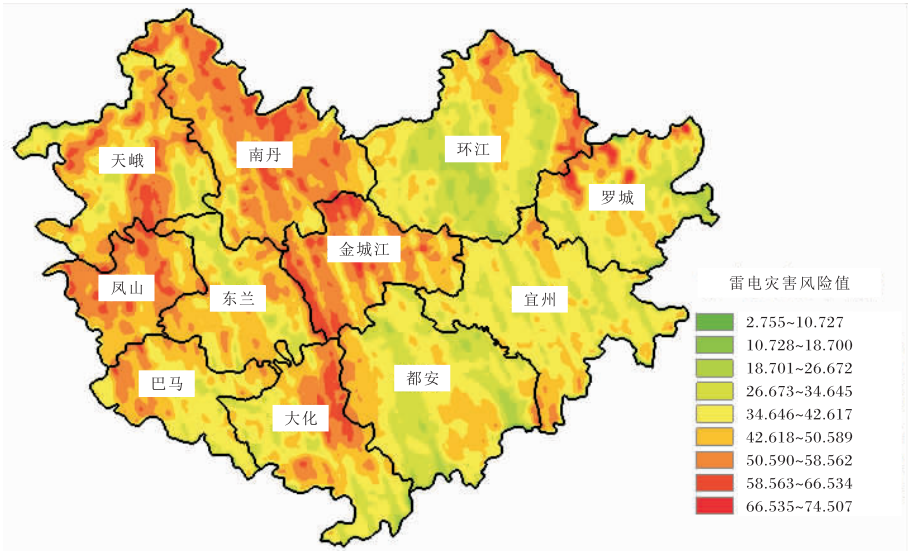


图 1 河池市雷电灾害风险区划(文见第 28 页 4)