

2015 年冬季苏州城市热岛特征研究¹

何松蔚¹、王成刚¹，姜海梅¹，曹乐¹，王新伟²

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏南京 210044; 2. 河南省气象局河南省气象服务中心, 河南郑州 450003)

【摘要】: 基于 Landsat 土地利用类型分类资料、夜间灯光影像资料、自动气象站资料以及大气边界层探测资料, 划分出城市、郊区以及湖区代表站, 分析了苏州 2015 年 1 月城市热岛日变化、昼夜差异特征以及城、湖温度差日变化特征, 并对苏州城市热岛分布特征以及城、湖大气边界层结构差异进行分析。结果显示: (1) 白天热岛强度小, 09~17 时热岛强度均小于 1°C, 最小值仅为 0.2°C; 夜间热岛强度大, 19~05 时热岛强度维持在 1.2°C 以上, 最大值为 1.7°C。(2) 城、湖温差白天为正, 夜间为负, 市区变温速率比湖区快约 0.2°C/h。(3) 苏州白天热中心形状不规则, 范围大, 城郊温差小, 夜间形成单一封闭稳定热中心, 热中心形状与市区有较好对应, 城、郊温差维持在 1.5°C 左右。冬季地面盛行西北风, 太湖湖陆风现象显著, 湖陆风和盛行风向共同影响城市热羽向西南方向发展。(4) 城、湖虚位温廓线在白天差异小, 均有不稳定边界层形成, 夜间市区仍维持不稳定边界层, 而湖区有稳定边界层发展, 近地层内干岛效应显著。(5) 城市热岛影响范围有明显日变化特征, 白天城市热岛影响范围小于 40m, 夜间大于 200m。

【关键词】: 苏州城市热岛 夜间灯光指数 城、郊代表站点 边界层结构

【中图分类号】: X16 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 09-2078-12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201809018

随着城市化进程的不断推进, 城市已经成为人类的主要栖息地, 到 2050 年世界人口的 66.4% 将居住在城市 (<https://esa.un.org>)。人口的高密度聚集使得城市形成了独特的小区域气候。城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 是城市温度高于周围郊区或乡村的现象, 是城市气候的主要表现特征^[1]。

热岛研究中, 一般用城郊温度差来表征热岛强弱^[2]。然而, 城郊站点该如何选取, 目前还没有一个统一标准^[2,3]。由于气象站点周边建筑物密度、高度、绿地面积、水体面积等差异, 会使得每个站点的资料代表性不同。因此, 在热岛研究中, 气象站点选择的差异会显著影响研究结果。以北京为例, Liu 等^[4]利用石景山站和密云站计算得到北京 1977~2000 年的月平均热岛强度范围为 0.5~2.5°C; 谢庄等^[5]利用官园站和密云站得到的 1998-2001 年的月平均热岛强度范围则为 0.9-3.3°C; 葛荣凤等^[6]利用 4 个城市站与密云站计算 1978~2013 年的月平均热岛强度范围为 0.12~3.87°C。上述研究工作表明观测站点的选择差异将显著影响城市热岛的强度。Ren 等^[7]、黄利萍等^[3]和于淑秋等^[8]认为热岛研究中, 需要更多关注城、郊观测站点的选择。为了更加合理的选取城市和郊区代表站点, 客观的反映城市热岛现象, 研究学者采用了不同的方法, 常用方法之一是通过相对城市中心的距离来划分城市站和郊区站^[3,9,10]。然而仅考虑相对城市距离的远近还不能较好反应人类活动和气象条件对热岛的影响。

¹收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2018-01-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0203304); 国家自然科学基金重点项目 (91544229); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 中国气象局气候变化专项 (CCSF201618)

作者简介: 何松蔚 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大
通讯作者 E-mail: wcg@nuist.edu.cn

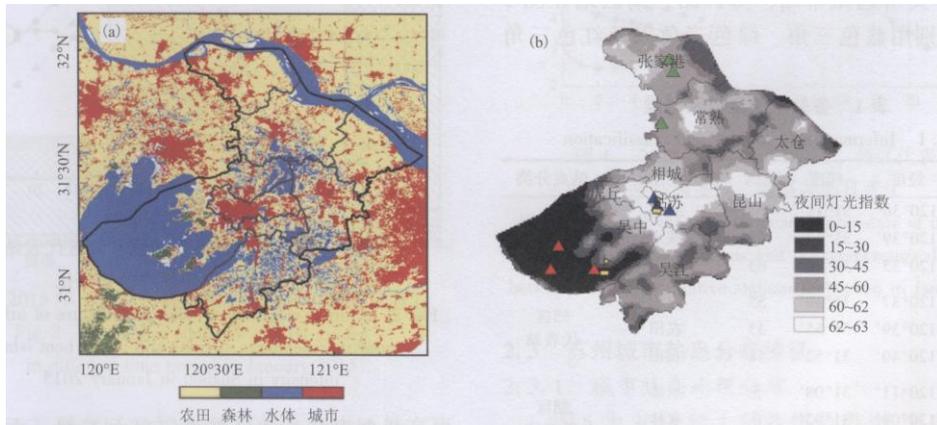
初子莹等^[11]利用 EOF 经验正交函数分解法选取城、郊站,但气象场的空间代表性及天气系统变化都会对选取结果有显著影响^[12],且各特征向量的物理含义不明确。Ren 等^[7]的研究中则是根据人口分布划分城、郊站。此方法仅考虑人类活动对热岛效应的影响,并没有将下垫面类型影响,站点代表性及局地气候特征影响考虑进来。本文将在前人的工作基础上,结合人类活动密集程度和土地利用类型来选取城、郊代表站,并采用多站平均法消除局地影响。

此外,胡嘉骢等^[13]认为热岛的分布特征应是一个随时间变化的三维结构,刘寿东等^[14],张礼春等^[15]分别对南京晴天城、郊大气边界层结构进行对比分析,结果显示,城、郊两地温度、稳定度以及相对湿度的垂直分布特征均有明显差异。Zhang 等^[16]的研究结果表明随着城市热岛面积的快速扩展,城市热岛对垂直大气的影响向上延伸了 50m。然而,现有工作中有关热岛的影响高度,热岛垂直结构的日变化演变特征等讨论较少。本文将利用 2015 年冬季外场观测资料对这一问题进行讨论。

苏州是中国东部快速发展城市的代表,城市用地范围扩展迅速^[17]。苏州夏季盛行东南风,冬季盛行偏北风^[18]。由于苏州西临太湖,湖面对陆地温度、水汽、风场有明显的调节作用^[19],康汉青等^[20]研究指出白天太湖湖面温度明显低于周围陆地。太湖的存在导致了苏州热岛效应的特殊性。杨健博等^[21]研究结果表明在晴天小风天气条件下,湖陆风环流可缓解苏州热岛强度的增加。然而有关苏州城市热岛的研究还较少,本文将对这一问题进行探讨。

1 资料和方法

本文用于分析苏州城市热岛的数据资料有:Landsat 土地利用类型资料、DMSP-OLS 夜间灯光影像资料、地面自动气象站数据以及垂直探空数据。其中,土地利用类型资料由美国 Landsat 卫星获取,该数据能很好的反映研究区域内土地利用类型分布情况和地表温度的空间分布^[22],2015 年苏州土地利用类型分布如图 1(a)所示。图 1(b)为 2013 年苏州地区夜间灯光影像资料,由美国 DMSP-OLS 卫星获取,该数据能较准确地反应人类活动的密集程度以及人口分布情况^[23]。自动气象站资料为全市 91 个站 2015 年 1 月 1 日~31 日逐小时数据。垂直探空数据为 2015 年 1 月 15~24 日期间的大气边界层垂直观测试验资料,市区观测站点南门站(31.30° N, 120.60° E; 7.0m)位于城市中心,人口密集,具有典型的城市下垫面特征;湖区观测站点东山村(31.04° N, 120.38° E; 18.7m)位于太湖的半岛之上,三面环湖,人口稀少。湖区边界层结构的研究多利用距湖面较近的观测站点资料进行分析^[24,25],东山村能够很好代表太湖区域下垫面特征,见图 1(b)。试验仪器采用 KZXL-11 型系留低空探测系统,大气边界层的温、湿数据是由搭载在系留气艇上的传感器测到的气温和相对湿度。该设备可以获取时间、高度、气压、气温、风向、风速、相对湿度共 7 个量。探测平均高度约 800m,数据采样间隔为 2s,每 3h 进行一次探空观测。由于受空域限制、天气条件、高空风速等众多影响因素,试验期间得到的两站的同步观测记录共有 10 次。数据分析过程中对超出合理范围的数据野点进行剔除,并利用方差检验方法进行质量控制。



注:蓝色三角形表示城市代表站,绿色三角表示郊区代表站,红色三角表示湖区代表站,黄色旗子表示探空站点。

图 1 2015 年苏州 Landsat 土地利用类型分类(a)和 2013 年夜间灯光影像资料(b)

Fig. 1 Land use data of Suzhou in 2015 from landsat observations (a) and night time light image in 2013 (b)

2 结果与讨论

2.1 城、郊代表站点的选取

在城市热岛强度特征的研究中，城、郊代表站点的选取是影响研究结果的关键因素。利用夜间灯光影像资料获取苏州城市化发展程度信息，将其按灯光强度（DN）划分为6个等级^[23,26]。将DN≥62的姑苏区、工业园区、相城区南部以及虎丘区东部视为典型市区，受人类活动影响最为显著；将DN值在30~60范围的区域视为郊区。太湖和长江流域DN≤15，几乎不受人为因素影响^[23]。土地利用类型与城市热岛分布具有很好的相关性，不同类型下垫面地表能量收支不同。城市多为建筑用地，粗糙度大，储热量多温度高，郊区多为农业、林业用地，粗糙度小，储热少温度低。结合土地利用信息、夜间灯光数据以及googleearth提供的下垫面信息，在选择城、郊代表站时，避开水域以及城市下风方向区域，将DN≥62，土地利用类型为城市用地且周围下垫面为高楼或交通用地的自动气象站选取为城市代表站（M3974、M7206、M7254）；将位于城市上游区域，DN值在30~60范围，且土地利用类型和下垫面信息均为为农田，森林的自动气象站选取为郊区代表站（M5940、M7246、M7247）；再将位于太湖，DN值在0~15范围，且周围下垫面类型为水体的自动气象站选取为湖区代表站（M3912、M3913、M5970），各代表站信息如表1所示。本文所选城市站，郊区站，湖区站在图1（b）中分别用蓝色三角、绿色三角以及红色三角表。

表1 各站点信息以及分类
Tab. 1 Information of stations and classification

| 站点 | 经度 | 纬度 | DN | 土地利用类型 | 站点分类 |
|-------|----------|---------|----|--------|-----------|
| M3974 | 120° 36' | 31° 18' | 63 | 城市 | 城市 |
| M7206 | 120° 39' | 31.17' | 63 | 城市 | 代表站 |
| M7254 | 120° 35' | 31° 20' | 63 | 城市 | |
| M5940 | 120° 37' | 31° 39' | 55 | 农田 | |
| M7246 | 120° 39' | 31° 55' | 45 | 农田 | 郊区 代表站 |
| M7247 | 120° 40' | 31° 52' | 58 | 农田 | |
| M3912 | 120° 11' | 31° 08' | 5 | 水体 | |
| M3913 | 120° 09' | 31° 02' | 0 | 水体 | 湖区 |
| M5970 | 120° 20' | 31° 02' | 14 | 水体 | 代表站 |

2.2 城市热岛昼夜差异

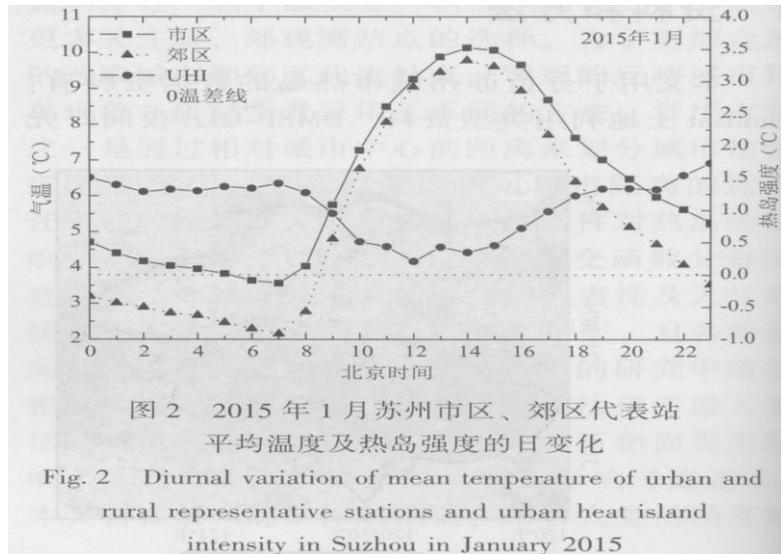
根据Oke^[27]提出的城市热岛强度度量方式，采用多站平均方式消除单一站点的局地影响^[28]，

热岛强度计算公式如下：

$$\overline{\Delta T_{u-r}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ui} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ri} \quad (1)$$

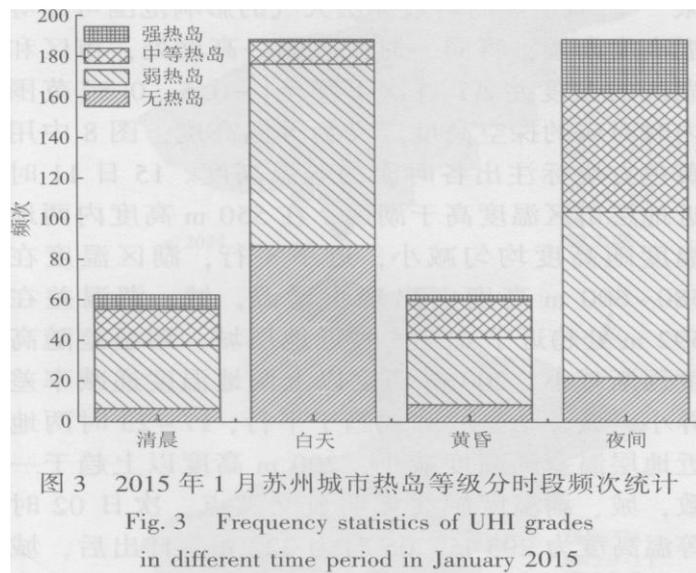
式中： $\overline{\Delta T_{u-r}}$ ， T_{ui} ， T_{ri} 分别为平均热岛强度（℃），城市代表站温度（℃）和郊区代表站温度（℃）；n为代表站点数量；i取1至n。苏州城、郊代表站点信息见表1，利用城、郊代表站点平均温度计算热岛强度。图2给出了2015年1月苏州市区和郊区的平均温度、热岛强度的日变化特征。由图可见，城、郊两地的温度变化趋势较为一致，但郊区温度始终低于市区。城市下垫面多为道路、建筑物等，热容量大，反射率小，导热率大，在相同太阳辐射条件下，可以吸收更多热量，

且不透水面积大使得城市区域由蒸发消耗的潜热少，湍流向上输送的热量多。郊区下垫面多为农田，林地等，热容量小，且下垫面透水性好，植被蒸腾作用显著，蒸发消耗的热量多。因此，在白天城市高温可维持时间较长，8℃：以上共计 7h，而郊区温度 8℃：以上仅有 5h。白天城、郊升温迅速，湍流混合强，温差减小，夜间城市下垫面不断释放白天储存的热量，同时受城市街谷效应影响，降温幅度小，19~23 时市区降温率约为 0.36℃/h，郊区约为 0.43℃/h。



热岛强度总体呈现夜间强白天弱。在夜间热岛强度相对稳定，19 时至凌晨 05 时均维持在 1.2℃ 以上。日出后随着城、郊温度的快速攀升，热岛强度迅速减小，09 时到 17 时热岛强度均小于 1.0℃，且波动较为明显，最小值出现在正午 12 时前后，为 0.2℃。此外，在人为活动和地表热力属性的影响下，在清晨 06~08 时段和傍晚 17~19 时段出现热岛高峰。

由于热岛效应在白天和夜间所受影响因素不同，导致热岛强度在不同时段有不同表现形式^[14]。为了进一步分析这一问题，现将一日划分成 4 个时段：清晨 06:00-08:00，白天 09:00~17:00，黄昏 18:00~20:00，夜间 21:00~凌晨 05:00（清晨和黄昏是边界层结构的转换期^[29]，需单独分析）。参考以往对城市热岛强度划分的标准^[30,31]，将热岛强度划分成四个等级：无热岛 $UHI < 0.5$ ；弱热岛 $0.5 \leq UHI < 1.5$ ；中等强度热岛 $1.5 \leq UHI < 2.5$ ；强热岛 $UHI \geq 2.5$ 。



对观测期间无天气过程发生的 504 个时次的样本进行统计分析, 结果如图 3 所示。在清晨和黄昏多为弱热岛和中等强度热岛, 强热岛出现频次较少。在白天强热岛和中等强度热岛现象的发生频率较低, 多为弱热岛和无热岛现象, 二者所占比重高达 93.6%。在夜间则强热岛现象发生频次明显增加, 统计结果显示 37 个强热岛样本中, 有 26 次发生在该时段。此外, 夜间中等强度和弱热岛现象所占比重为 74.6%, 而无热岛现象的出现频次所占比重仅为 11.6%。

由于苏州市区紧邻太湖, 水体比陆地具有更大比热, 升温较慢, 湖陆之间形成较大温差^[20], 再有, 二者在人口密集度、粗糙度等方面的不同使得市区和湖区在气象要素上呈现明显差异。为进一步探讨这一问题, 选取位于湖区的 3 个自动气象站资料和城市代表站资料进行对比分析。图 4 为 2015 年 1 月城、湖两地温度及二者温差的日变化图。由图可见, 夜间湖区的温度略高于市区温度, 最大温差约为-0.7℃。经过夜间降温, 城、湖均于 07 时达到温度最低值。日出后两地均迅速升温, 由于湖体比热大, 致使湖区升温率仅为 0.58℃/h (08: 00-14: 00), 市区则为 0.87℃/h。09 时之后市区温度开始高于湖区温度, 城湖温差为正值, 并于正午 12 时达到最大值, 1.81。此后, 随着太阳辐射的减小, 城、湖两地开始降温, 市区降温速率为 0.53℃/h, 湖区为 0.35℃/h。在城市快速降温的作用下, 市区温度在 20 时前后开始低于湖区温度, 城湖温差转为负值, 并逐渐趋于稳定。对比分析城、郊和城、湖温度差日变化特征, 城、郊温差始终大于 0, 夜间温差大, 日出后温差迅速减小, 正午 12 时最小, 而城湖温差白天大于 0, 日出后市区升温迅速而湖区升温缓慢, 08~12 时温度差梯度大, 日落后市区降温迅速, 湖区降温缓慢, 温差逐渐增大, 夜间城湖温差小于 0, 16 时-20 时温度差梯度大, 湖区变温率比市区慢约 0.2℃/h。

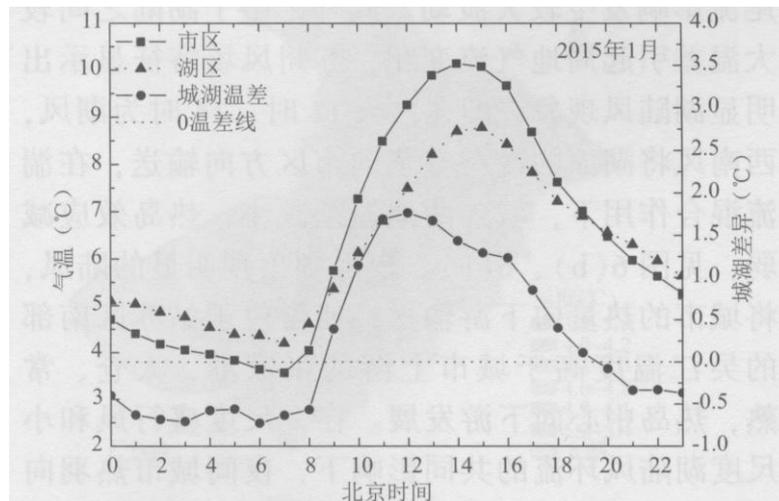


图 4 2015 年 1 月苏州市区、湖区代表站平均温度及二者温差的日变化

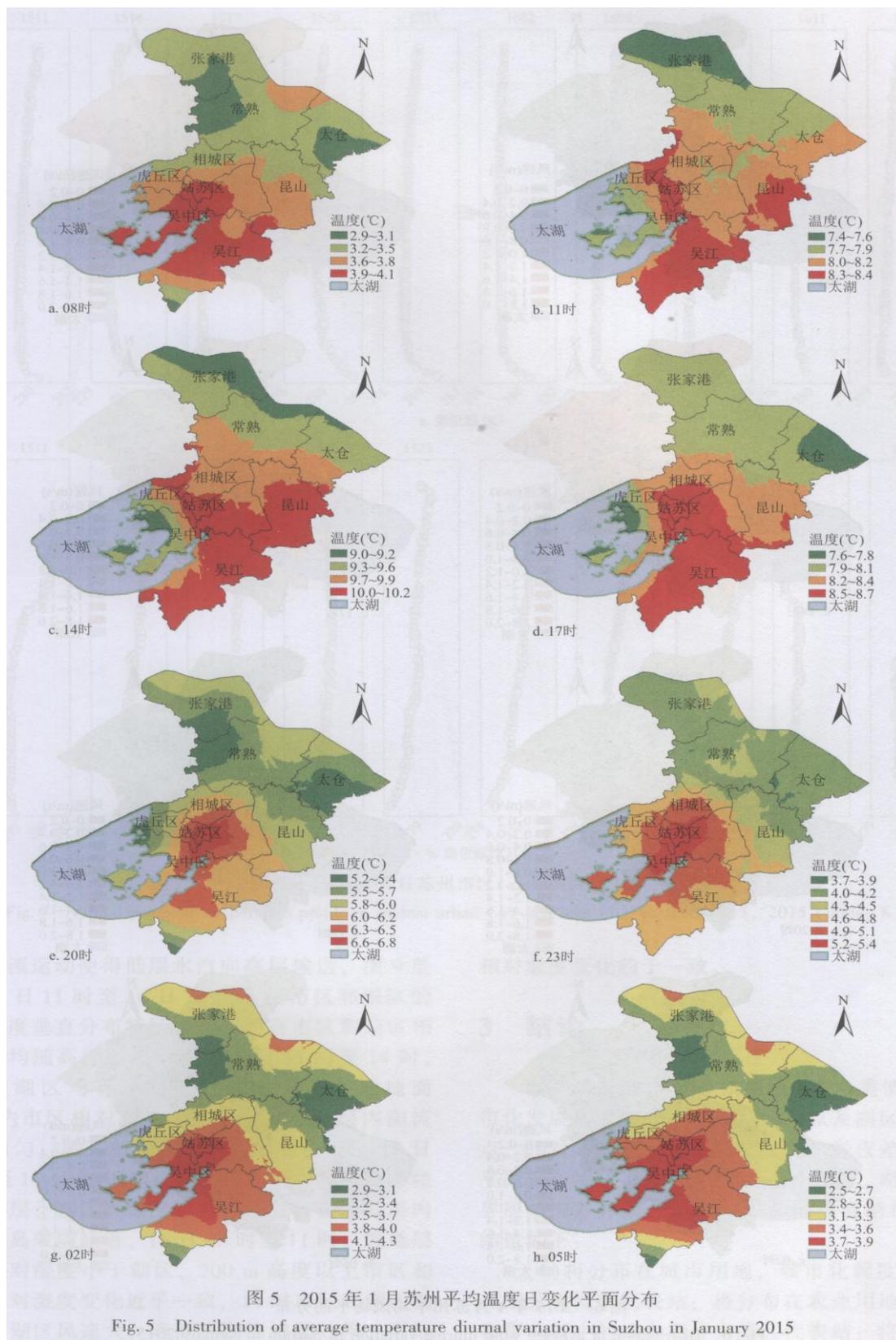
Fig. 4 Diurnal variation of mean temperature of urban and lake representative stations and the temperature difference between the representative stations in Suzhou in January 2015

2.3 苏州城市热岛分布特征

2.3.1 城市热岛地理分布

图 5 为 2015 年 1 月苏州全市 91 个自动气象站整点时刻的月平均温度日变化分布。由图可见, 在白天苏州地区的热中心范围大, 且形状不规则; 而在夜间形成单一封闭稳定热中心, 形状与主城区形状配合较好。其中, 08 时高温区主要分布在姑苏区, 吴中区以及吴江, 在小型湖泊处出现一个凹陷低温区, 城、郊最大温度差为 1.2℃。由图 5(b)~(d) 可见, 11~14 时热中心主要分布在苏州南部地区, 低温区位于北部地区, 且城、郊温差小, 仅有 1.0℃, 形成原因主要是苏州地理纬度跨度较大。17 时开

始热中心开始向南缩小，热岛强度逐渐变强。由图 5(e)-(h)可见，入夜后，20 时、23 时、02 时、05 时城市热岛中心变得更为明显，形状也较为一致，城郊最大温差均维持在 1.5℃左右。



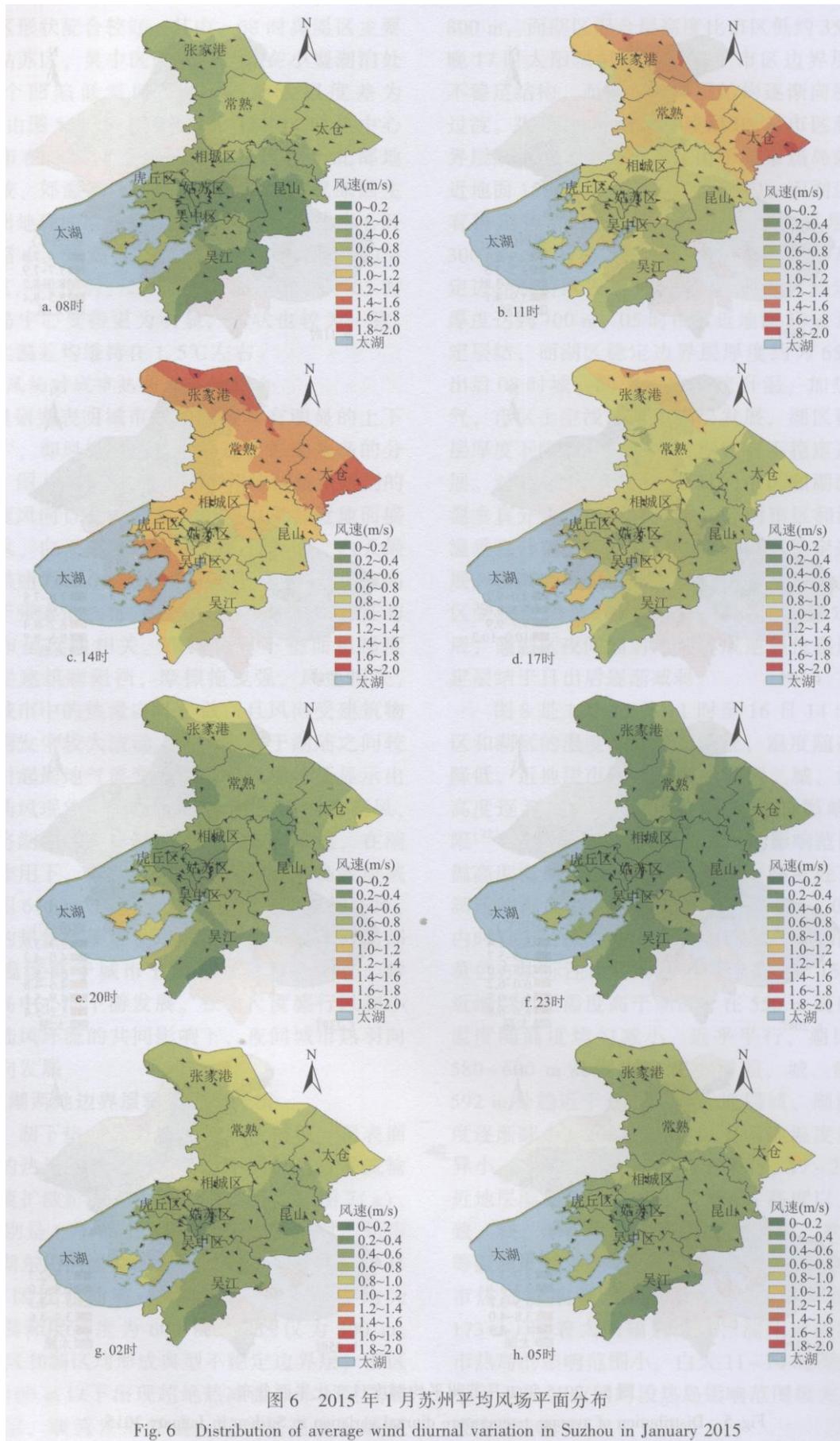


图6 2015年1月苏州平均风场平面分布

Fig. 6 Distribution of average wind diurnal variation in Suzhou in January 2015

2.3.2 风场对城市热岛分布的影响

大量研究表明城市热岛效应具有明显的上下游效应^[1]，即风场对热量的输送会影响热岛的分布情况。图6为2015年1月苏州地区整点时刻的平均风速风向日变化分布。由图可见，近地面盛行西北风，白天平均风速明显大于夜间，白天最大平均风速为2.0m/s，夜间为1.0m/s。风速高值区位于张家港、常熟和太仓，风速分布特征与温度分布呈反向相关。市区由于下垫面粗糙度大，高层建筑物阻挡，摩擦拖曳强，风速损失，不利于城市中的热量向外扩散，且风向受建筑物尾流影响发生较大波动。此外，由于湖陆之间较大温差引起局地气流变化，苏州风场特征显示出明显湖陆风现象，即在白天11时、14时为湖风，西南风将湖面的冷湿空气向市区方向输送，在湍流混合作用下，城郊两地温差减小，热岛效应减弱，见图6(b)、6(c)。夜间则出现明显的陆风，将城市的热量向下游输送，使得位于姑苏区南部的吴江温度高于城市上游的张家港、太仓、常熟，热岛中心向下游发展。在大尺度盛行风和小尺度湖陆风环流的共同影响下，夜间城市热羽向西南方向发展。

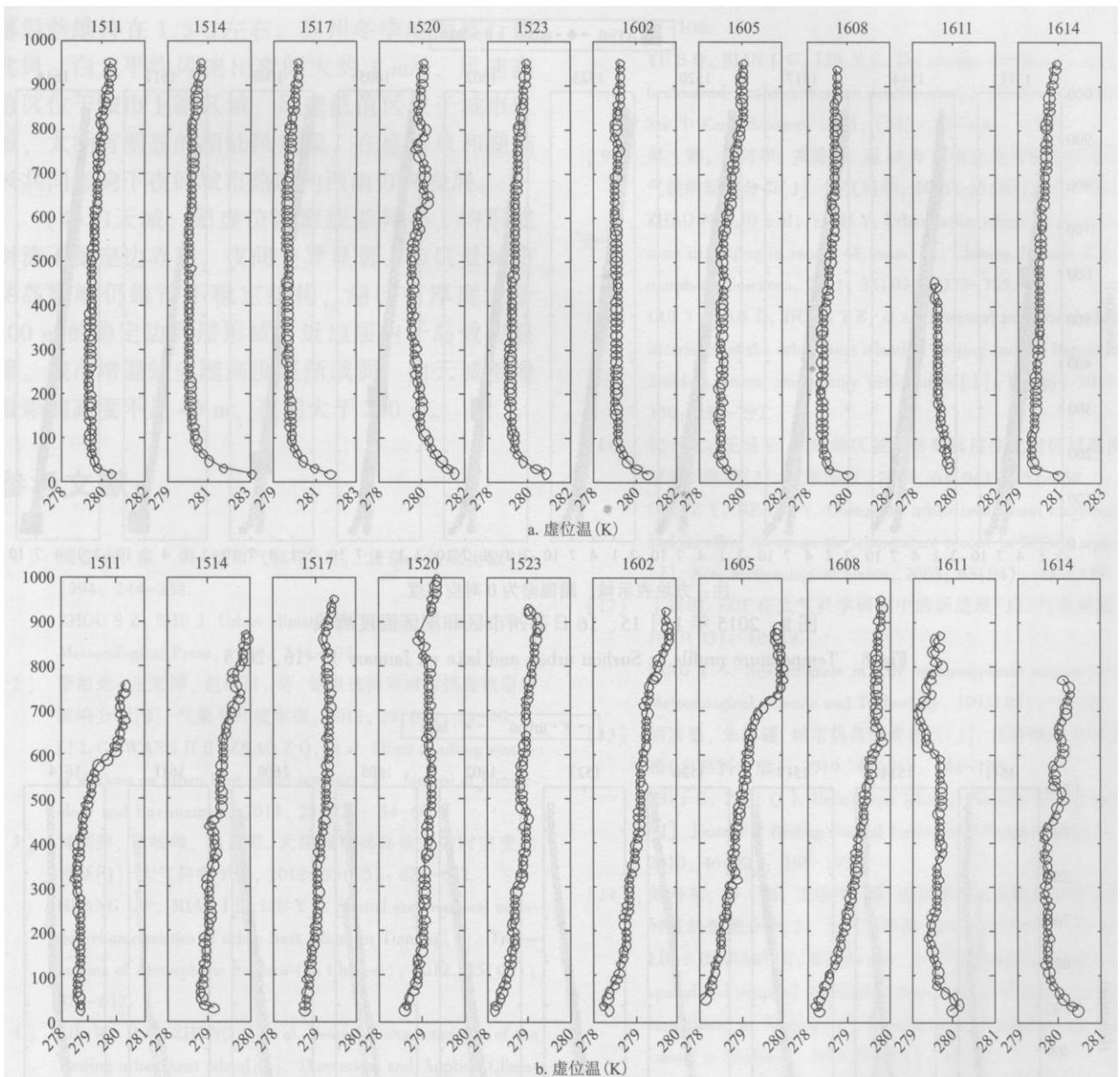
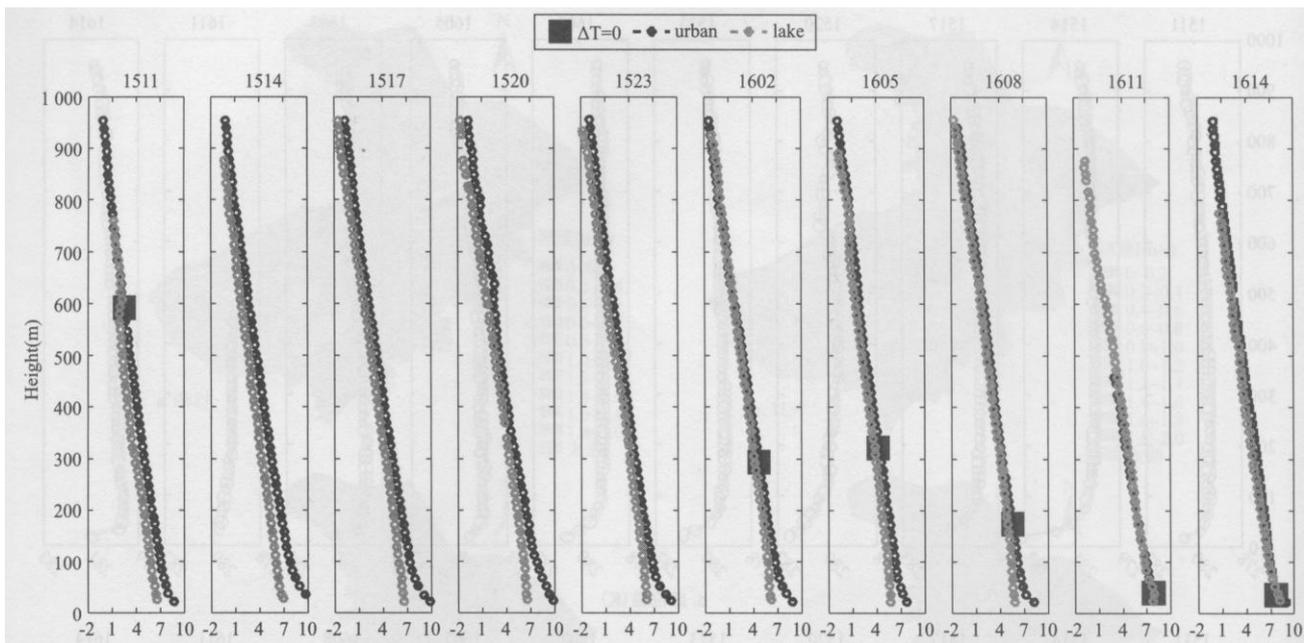


图7 2015年1月15日~16日苏州市区(a)和湖区(b)虚位温廓线对比

Fig. 7 Virtual potential temperature profile in suzhou urban (a) and lake (b) on January 15, 2015 (units: K)



注：方块表示城、湖温差为 0 对应高度。

图 8 2015 年 1 月 15、16 日苏州市区和湖区温度廓线

Fig. 8 Temperature profile in Suzhou urban and lake on January 15-16, 2015

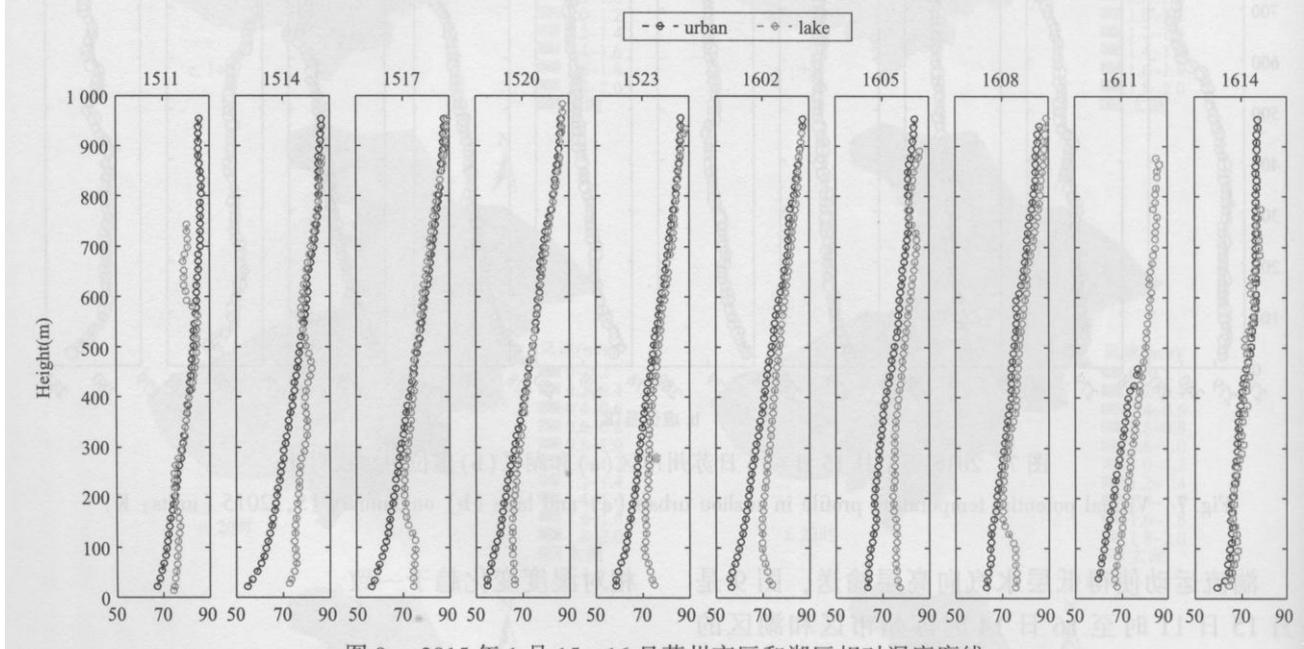


图 9 2015 年 1 月 15、16 日苏州市区和湖区相对湿度廓线

Fig. 9 Relative humidity profile in Suzhou urban and lake on January 15-16, 2015 (units: %)

2.4 城湖两地边界层垂直结构分析

城、湖下垫面热力性质差异使得城、湖表面和大气的热量和水分交换特征不同，通过平流输送和湍流扩散影响到大气边界层^[16,20]。图 7(a)、7(b)分别是 1 月 15 日 11 时至 16 日 14 时苏州市区和太湖东山的虚位温廓线。由图 7 可见，15 日 11 时市区近地面有一薄不稳定层，厚度约为 50m，混合层高度为 600m。湖区仅为 300m。14 时市区和湖区均形成典型不稳定边界层，市区

近地层 100m 以下出现超绝热减温分布, 空气层结不稳定, 湍流发展旺盛, 混合层高度发展至 800m, 而湖区混合层高度比市区低约 350m。傍晚 17 时太阳辐射逐渐减弱, 市区边界层仍维持不稳定结构, 而湖区边界层结构逐渐向稳定层结过渡。夜间 20 时至次日凌晨 05 时市区和湖区边界层结构差异显著, 市区由于城市热岛效应影响近地面 150m 仍维持不稳定结构, 而湖区近地层有稳定边界层发展, 20 时稳定边界层厚度达 300m, 23 时稳定边界层发展至 450m 局度, 稳定边界层持续发展, 16 日 02 时湖区稳定边界层厚度达到 700m。05 时市区近地面 50m 形成不稳定层结, 而湖区稳定边界层厚度约为 650m。日出后 08 时城、湖表面均迅速升温, 加热低层大气, 市区上空浅对流边界层发展, 湖区稳定边界层厚度下降 100m, 11 时湖区有不稳定边界层发展。对比分析 15 日和 16 日的市区和湖区的虚位温垂直分布特征, 白天 11~14 时市区和湖区虚位温垂直分布差异不大, 均有对流不稳定边界层发展。夜间虚位温垂直分布特征差异最为显著, 市区受城市热岛效应影响, 有对流不稳定层结发展, 而湖区夜间辐射冷却形成逆虚位温层结, 稳定层结于日出后逐渐减弱。

图 8 是 1 月 15 日 11 时至 16 日 14 时苏州市区和湖区的温度垂直分布特征, 温度随高度逐渐降低, 近地层市区温度高于湖区, 城、湖温差随高度逐渐减小, 城市增温效应的影响高度有限^[32]。城市热岛对边界层大气的影响范围可用等温高度衡量, 将同一时段、同一高度处, 市区和湖区的温度差 ΔT 首次下降至 $[-0.5, 0.5]$ 范围内时对应的探空高度定义为等温高度, 图 8 中用黄色方块标注出各时次的等温高度。15 日 11 时近地层市区温度高于湖区, 在 550m 高度内两地温度随高度均匀减小, 近乎平行, 湖区温度在 580~600m 高度内出现小增温, 城、湖温差在 592m 处趋近于 0, 14 时近地层城、湖温差随高度逐渐减小, 200m 高度以上两地温度递减率差异小, 城、湖温度廓线趋于平行, 17~23 时两地近地层温差随高度减小, 200m 高度以上趋于一致, 城、湖温度廓线无明显交叉点。次日 02 时等温高度为 293m, 05 时为 322m。日出后, 城市热岛影响高度迅速降低, 08 时等温高度为 173m, 随着太阳辐射增强, 湍流运动加强, 城市热岛的影响范围小, 白天 11~14 时等温高度均: 小于 40m, 夜间时段热岛影响范围较大, 等温高度大于 200m。

湍流运动使得低层水汽向高层输送, 图 9 是 1 月 15 日 11 时至 16 日 14 时苏州市区和湖区的相对湿度垂直分布特征, 总体而言市区和湖区相对湿度均随高度逐渐增加。15 日 11 时至 14 时, 市区和湖区均有不稳定边界层发展, 近地面 150m 内市区相对湿度小于湖区。混合层内湍流混合均匀, 城、湖相对湿度值趋于一致。15 日 20 时至 16 日 05 时市区受城市热岛影响维持不稳定边界层, 湖区有稳定边界层发展, 在近地层内城市热岛效应显著。16 日 08 时至 11 时, 近地层市区相对湿度小于湖区, 200m 高度以上市区和湖区相对湿度变化近乎一致, 14 时市区和湖区温差小, 湖区风速大, 降低了湖面增湿效果, 两地相对湿度变化趋于一致。

3 结论

本文结合 2015 年苏州用地类型分类情况和城市化发展程度划分出城市、郊区以及湖区代表站点, 并对苏州城市热岛的日变化、昼夜差异以及平面分布特征等进行分析, 且对比城、湖大气边界层结构差异来分析城市热岛的垂直结构特征, 结论如下:

(1) 将分布在城市用地, 城市化程度高的站点划分为城市代表站; 将分布在农业用地且受城市影响较小的站点划分为郊区代表站; 将分布在太湖半岛且几乎不受人因素影响的站点划分为湖区代表站。

(2) 城、郊温度变化趋势一致, 市区温度始终高于郊区, 白天城市高温维持时间比郊区长约 3h, 夜间时段市区降温率比郊区小, 热岛强度总体呈夜间强白天弱特征, 白天弱热岛或无热岛现象发生的概率为 93.6%, 强热岛主要发生在夜间时段, 据统计共 37 次强热岛, 其中 26 次发生在夜间。城、湖温度变化趋势一致, 城市温度增(降)温速率均大于湖区, 白天城、湖温差为正, 夜间转为负。城市、郊区以及湖区下垫面热力性质差异导致城、郊温差和城、湖温差日变化差异显著。

(3) 2015 年 1 月苏州白天热中心形状不规则, 范围大, 城郊温差小, 夜间形成单一封闭稳定热中心, 热中心形状与市区有较好对应, 城、郊温差维持在 1.5°C : 左右。苏州冬季地面盛行西北风, 白天平均风速比夜间大约 1m/s , 风速高值区位于城市上游区域, 风速低值区位于城市区域, 太湖有明显的湖陆风现象, 在盛行风和湖陆风共同影响下夜间城市热羽向西南方向发展。

(4) 白天城、湖虚位温廓线差异小,均形成对流不稳定边界层,夜间差异显著,市区受城市热岛影响仍维持不稳定结构,湖区有厚度大于300m的稳定边界层形成,近地层内干岛效应显著。城市增温效应随高度逐渐减弱,白天城市增温影响高度不足40m,夜间大于200m。

参考文献:

[1]周淑贞,束炯.城市气候学[M].北京:气象出版社,1994:244-338.

ZHOU S Z, SHU J. Urban climatology. Beijing : China [M]. Meteorological Press, 1994: 244-338.

[2]李丽光,王宏博,赵梓淇,等.站点选择对城市热岛效应的影响分析[J].气象与环境学报,2013,29(02):54-60.

LI L G, WANGHB, ZHAO ZQ, et al. Effect of sifting weather stations on urban heat island intensity [J] • Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(02) : 54-60.

[3]黄利萍,苗峻峰,刘月琨.天津城市热岛效应的时空变化特征[J].大气科学学报,2012,35(05):620-632.

HUANG L P, MIAO J F, LIU Y K. Spatial and temporal variation characteristics of urban heat island in Tianjing[J]. Transactions of Atmospheric Science (in Chinese) , 2012, 35(05): 620-632.

[4] LIU W, JI C, ZHONG J, et al. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 87: 213-221

[5]谢庄,崔继良,陈大刚,等.北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析[J].气候与环境研究,2006,11(01):69-75.

XIE Z, CUI J L, CHEN D G, et al. 2006. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese) , 11(01) : 69-75.

[6]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),2016,52(02):210-215.

GE R F, ZHANG L X, WANG J L, et al. Multi-scale temporal characteristics and periodic analysis of urban heat island: A case study of Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(02) : 210-215.

[7] REN GY, ZHOU Y Q, CHU Z Y, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China [J]. Journal of Climate, 2008, 21(06): 1333-1348.

[8] 于淑秋,卞林根,林学椿.北京城市热岛“尺度”变化与城市发展[J].中国科学(D辑:地球科学),2005(S1):97-106.

YU S Q, BIAN L G, LIN X C. The change of Beijing's urban heat island 'Scale' and urban development[J]. Science in China Ser. D Earth Science, 2005, (S1) : 97-106.

[9] 赵娜,刘树华,虞海燕.近48年城市化发展对北京区域气候的影响分析[J].大气科学,2011,35(02):373-385.

ZHAO N, LIU S H, YU H Y. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years [J] • Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(02) : 373-385.

[10] CUI Y, YAN D, HONG T Z, et al. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island in Beijing and the impact on building design and energy performance [J]. Energy, 2017, 130: 286-297.

[11] 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响[J]. 气象学报, 2005, 63(04): 152-158.

CHU Z Y, REN G Y. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region [J]. Acta Meteorological Sinica, 2005, 63(04) : 152-158.

[12] 丁裕国. EOF 在大气科学研究中的新进展[J]. 气象科技, 1993(03) : 10-19.

DING Y G. New progress in EOF in atmospheric science [J]. Meteorological Science and Technology, 1993(03) : 10-19.

[13] 胡嘉骢, 朱启疆. 城市热岛研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(02): 186-193.

HU J C, ZHU Q J. Urbna heat island: Progress on the field [J]. Journal of Beijing Normal University (Natunal Science), 2010, 46(02) : 186-193.

[14] 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]. 大气科学报, 2014, 37(01): 19-27

LIU S D, JIANG R, WANG C G, et al. Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing [J] • Transactions of Atmospheric Sci-ences (in Chinese) , 2014, 37(01) : 19-27.

[15] 张礼春, 朱彬, 牛生杰, 等. 南京市冬季市区和郊区晴天 大气边界层结构对比分析[门. 南京信息工程大学学报(自 然科学版), 2009, 1(04): 329-337.

ZHANG L C, ZHU B, NIU S J, et al. Contrastive analysis of atmospheric boundary layer structures in fair weather of winter between urban and suburban area of Nanjing [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Nat-ural Science Edition, 2009, 1(04) : 329-337.

[16] ZHANG N, ZHU LF, ZHU Y. Urban Heat Island and Bounda-ry Layer Structures under Hot Weather Synoptic Conditions: A Case Study of Suzhou City, China[J]. Advances in Atmospher-ic Sciences, 2011, 28(04) : 855-865.

[17] 朱焱, 朱莲芳, 徐永明, 等. 基于 Landsat 卫星资料的苏 州城市热岛效应遥感分析[J]. 高原气象, 2010, 29(01): 244-250.

ZHU Y, ZHU LF, XU Y M, et al. Study on the urban heat is-land of Suzhou city based on Landsat remote sensing [J]. Plat-eau Meteorology, 2010, 29(01) : 244-250.

[18] 赵亚芳. 环太湖地区城市热岛特征的遥感资料分析与数值模拟研究[D]. 南京大学, 2015.

ZHAO Y F. Remote sensing data analysis and numerical simulation of the urban heat island effects in lake Tai Basin[D]. Nanjing University, 2015.

[19] 陆鸿宾, 魏桂玲. 初秋台风外围和高压影响下的太湖气象状况[J]. 海洋湖沼通报, 1985(04): 23-29.

LU H B, WEI G L. Meteorological condition of outside of typhoon and the influence of high pressure on Lake Tai in early autumn [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1985 (04) : 23-29.

[20] 康汉青, 朱彬, 朱彤, 等. 苏州—无锡—常州城市带热 岛效应个例研究[J]. 大气科学学报, 2014, 37(04): 432- 440.

KANG H Q, ZHU B, ZHU T, et al. Investigation of an urban heat island episode along Suzhou - Wuxi - Changzhou urban cluster [J]. Trans Atmos Sci, 37(04) : 432-440.

[21] 杨健博, 刘红年, 费松, 等. 太湖湖陆风背景下的苏州城 市化对城市热岛特征的影响[门]. 气象科学, 2013, 33 (05) : 473-484.

YANG J B, LIU H N, FEI S, et al. The impact of urbanization on the urban heat island in Suzhou under the influence of Taihu lake-land breeze [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(05) : 473-484.

[22] REN GY, CHUZ Y, CHEN Z H, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34 (05) : 89-103.

[23] WEI C, YAOZ, WEUUN G, et al. The investigation of urbanization and urban heat island in Beijing based on remote sensing [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 216: 141-150.

[24] 李照国, 吕世华, 奥银焕, 等. 鄂陵湖湖滨地区夏季近地层 微气象特征与碳通量变化分析[门]. 地理科学进展, 2012, 31(05) : 602-608.

LI Z G, LV S H, AO Y H, et al. Analysis of micrometeorology and CO₂ flux characteristics over lake Ngoring lakeside region in summer[J]. Progress in Geography, 2012, 31(05): 602- 608.

[25] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错湖区大气边 界层结构分析[J]. 高原气象, 2008, 27(06): 1205 -1210. LV Y Q, MA Y M, LI M S, et al. Study on characteristic of atmospheric boundary layer over lake Namco region, Tibetan plateau [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(06) : 1205-1210.

[26] 刘勇洪, 房小怡, 张硕, 等. 京津冀城市群热岛定量评估[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5818-5835.

LIU Y H, FANG X Y, ZHANG S, et al. Research on quantitative evaluations of heat island for the Beijing-Tianjing-Hebei agglomeration [J]. Acta Ecological Sinica, 2017, 37 (17) : 5818-5835.

[27] OKE T R, EAST C. The urban boundary layer in Montreal [J]. Boundary Layer Meteorology, 1971, 1: 411-437

[28] 刘继韩. 论城市热岛强度的表示方法[J]. 地理研究, 1987, 6(03): 50-56.

LIU J H. On the methods of expressing the urban heat island intensity [J]. Geographical Research, 1987, 6(03) : 50-56.

[29] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 256-262.

SHENG P X, MIAO J T, LI J G, et al. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003 : 256-262.

[30] 周明煜, 曲绍厚, 李玉英, 等. 北京地区热岛和热岛环流特征[J]. 环境科学, 1980(05): 12-18.

ZHOU M Y, QU S H, LI Y Y, et al. Characteristics of heat island and heat island circulation in Beijing area [J]. Environment Science, 1980(05) : 12-18.

[31] 张艳, 鲍文杰, 余琦, 等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. 地球物理学报, 2012, 55(04): 1121-1128.

ZHANG Y, BAO W J, YU Q, et al. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity [J] • Chinese Journal of Geophysics. 2012, 55(04) : 1121-1128.

[32] 李子华, 唐斌, 任启福. 重庆市区冬季热岛和湿岛效应的研究[J]. 地理学报, 1993, 48(04): 358-366.

LI Z H, TANG B, REN Q F. A study on the effect of the heat and wet island in the city of Chongqing during wintertime [J] • Acta Geographica Sinica, 1993, 48(04): 358-366.