傅娜,陈葆德,谭燕,等.2014.上海自动站气温资料的空间质量控制与特征分析[J].大气科学学报,37(2):199-207.
Fu Na,Chen Bao-de,Tan Yan,et al.2014.Spatial quality control and characteristic analysis of AWS temperature data in Shanghai[J].Trans Atmos Sci,37(2):199-207.(in Chinese)

上海自动站气温资料的空间质量控制与特征分析

傅娜[1],陈葆德[2],谭燕[2],周伟灿[3]
(1.舟山气象局,浙江 舟山 316021;2.上海台风研究所,上海 200030;3.南京信息工程大学,江苏 南京 210044)

摘要:运用 Barnes 插值方法和 2011 年 7 月 1 日 00 时至 2012 年 6 月 30 日 23 时(北京时间)逐时自动站气温资料,对 Barnes 插值方法的空间一致性质量控制进行研究,研究表明该方法在上海及华东地区有一定的适用性,同时分析了代表性区域的资料特征。结果表明:非降水日情况下,陆地站点和海边站点的气温具有显著的日变化特征,09 时与 18 时左右两者之间差异最小;白天(夜晚),陆地(海边)站点气温高于海边(陆地)站点,最高(最低)气温差异约为 0.74 ℃(0.79 ℃),多数时刻海陆差异显著,同时海陆气温日变化曲线不同的原因与日照、风向风速相关。此外,自动站资料能够充分反映出有天气过程时气象要素的变化特征,并能体现城市热岛效应。

关键词:自动站;空间质量控制;气温;特征分析
中图分类号:P413 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-7097(2014)02-0199-09

Spatial quality control and characteristic analysis of AWS temperature data in Shanghai

FU Na[1],CHEN Bao-de[2],TAN Yan[2],ZHOU Wei-can[3]
(1.Zhoushan Meteorological Bureau,Zhoushan 316021,China;2.Shanghai Typhoon Institute,Shanghai 200030,China;
3.Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044,China)

Abstract:Based on the Barnes interpolation method and the hourly AWS(automatic weather station) temperature data from 00:00 BST 1 July 2011 to 23:00 BST 30 June 2012,this paper studies the space consistency quality control by Barnes interpolation method which has some applicability in Shanghai and East China.Analysis of the characteristic of representative areas shows that,on the day without precipitation,the temperature of land stations and seaside stations has significant diurnal variation characteristics and the temperature difference is minimum between 09:00 BST and 18:00 BST.In the daytime (nighttime),the temperature of land(seaside) stations is higher than that of seaside(land) stations,and the highest(lowest) temperature difference is about 0.74 ℃(0.79 ℃).Besides,the temperature difference is striking at most moment,and owes to the sunlight,wind speed and direction.Further,the AWS data are sensitive to variations of meteorological elements during weather processes and can reflect urban heat island effect.

Key words:automatic weather station;spatial quality control;temperature;characteristic analysis

0 引言

除雷达、卫星遥感、飞机观测、GPS/MET 等非常规资料外,自动站资料也是中尺度、短时临近预报所依靠的重要资料之一,同时高分辨率的自动站观测资料也可作为预报检验资料。目前上海有 100 多

收稿日期:2012-04-28;**改回日期**:2014-02-24
基金项目:上海市科委科研计划项目(10231203700)
通信作者:傅娜,硕士,研究方向为中尺度天气集合预报,funa20051301130@163.com.

个自动站,其观测要素主要有温、压、湿、风速风向和能见度等。由于自动站的特殊性,其分布密集、地形差异大、数据实时性强等,质量问题比人工常规站显得更为复杂(陶士伟和徐枝芳,2007),可能出现的数据误差主要有系统误差、粗大误差、随机误差和微气象误差(王海军等,2007)。因此需要对自动站资料进行质量控制。国内外针对气象自动站资料的质量控制已作大量研究及应用(王新华等,2006;窦以文等,2008;任芝花等,2010)。孙娟和胡平(2009)对上海自动气象站实时数据做了较有效的质量控制,但其空间一致性检查由于采用站点与该站点所在的区域平均做比较,故一方面选取区域过大,另一方面忽略了微气象误差(World Meteorological Organization,2004)。微气象误差由小尺度天气系统扰动引起。由于观测系统的时空分辨率很高,所以小尺度天气系统不能被所有的站点观测到。当待测站观测到此天气事件(如暴雨)时,引起气温骤降,而邻近站未观测到,从而导致待测站与邻近站相比,为"异常"。因此,本文将在此基础上对自动站气温资料做进一步的空间质量控制。空间一致性检查是自动站质量控制的常用方法之一,在实际工作中,使用较多的空间一致性检查方法有空间插值法(Luo et al.,1998;Snell et al.,2000)、最近邻域法(王海军等,2007)、反向距离法(刘宇等,2006)、空间回归检验法(刘小宁等,2006)、Madsen-Allerupt 法(熊安元,2003)。目前利用 Barnes 方法(Barnes,1964)进行空间质量控制的研究较少。郭静(2011)采用 Barnes 方法对江苏自动站进行了质量控制,由于其选取的影响半径过大(50 km),忽略了待测站点受天气系统影响而出现的异常情况。此外,自动站资料也能反映城市热岛、海陆差异等特性。如辛跳儿等(2009)利用 2005 年 1 月至 2008 年 8 月上海市 11 个自动站逐时资料,分析了城市和郊区气温季节变化和日变化规律。本文将利用所有的上海自动站资料,对 2011 年 7 月 1 日 00 时至 2012 年 6 月 30 日 23 时(北京时间,下同)观测期间逐时气温资料进行分析,通过 Barnes 插值方法进行高精度空间一致性检查,同时考虑待测站点受天气系统影响的情况;此外研究观测资料的合理性与可靠性。

1 资料

1.1 自动站介绍

上海自动气象站(automatic weather station,AWS)主要包括中国气象局审核的一、二级站点和上海市气象局审核的一、二、三级站点,图 1a 为上海地区自动站的分布情况。将整个上海划分为 16 个区域(分别记为 a1—a16,包括中心城区、8 个郊区、1 个郊县及 5 个小岛,详见图 1b),主要提供 1 h 累积

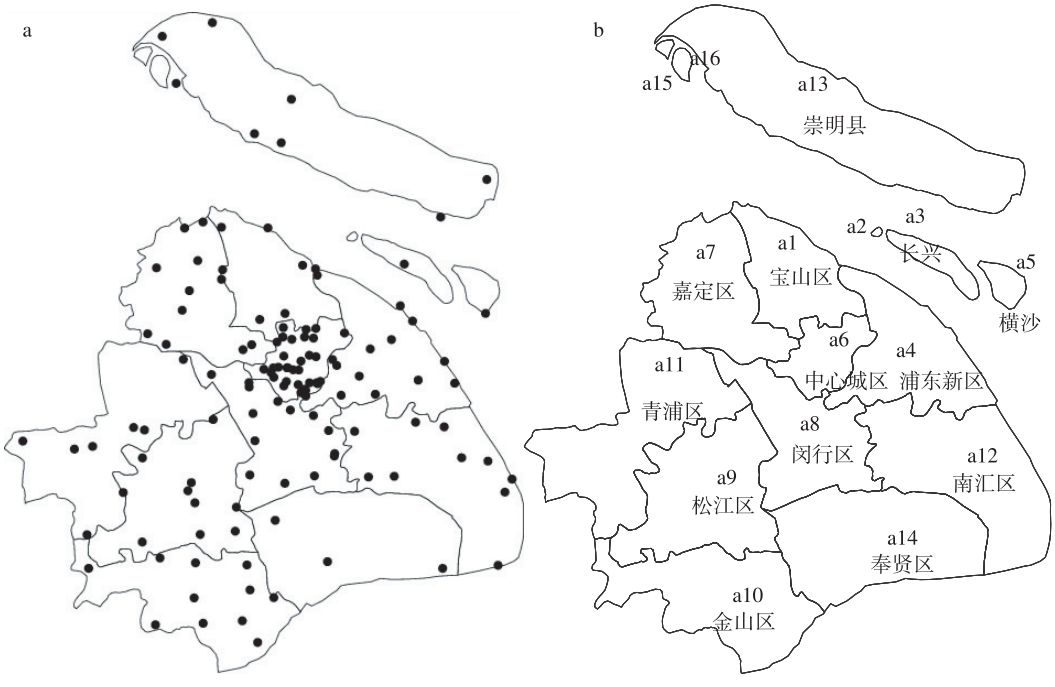

图 1 上海自动站分布(a)和上海分区情况(b)

Fig.1 (a) Distribution of AWSs and (b) regionalization in Shanghai

雨量、气温、瞬时风速风向、能见度等实况资料,对应采用算术平均法进行面气象要素的计算。本文使用的自动测站总数为 129 个。图 2 为各区域分布的自动站点总数。可见,中心城区站点分布密集,其他各区站点数不足中心城区一半,同时站点的空间分布不均匀,如宝山、闵行站点均设置在区域边界附近,此外崇明中东部站点稀缺,而奉贤有效站点仅为 3 个。从站点分布来看,气象要素的面平均准确率,应是中心城区的资料最具代表性,相对而言,奉贤、崇明等几个站点稀少、分布极不均匀的区域的代表性较差。因为自动站观测资料具有高分辨特性,所以很难保障所有测站点都能满足视野开阔无障碍物的环境要求。下面将对自动站点的气温资料进行验证分析,研究自动站资料的可靠性。

1.2　所用的观测资料

上海位于中国大陆海岸线中部的长江口,以中心城区向外拓展,其中宝山、浦东、南汇、奉贤、金山部分地区靠近海边,此外包括 3 个主要岛屿——崇明岛、长兴岛、横沙岛。本文选取 2011 年 7 月 1 日 00 时至 2012 年 6 月 30 日 23 时逐时自动站气温资料,研究观测资料的可靠性。表 1 给出了选取时段内各区域观测资料的缺测率。在上述观测期内(即 8 784 h),平均缺测 709 h,缺测率为 8.1%(当各区域每个时次的站点少于 90%时记为缺测),分析发现:缺测较多时次的区域如浦东、嘉定、崇明分别对应 98612、98804、98004 自动站点出现 48.6%、85.2%、76.4%的缺测率,将其剔除后,缺测率降为 2.9%、1.5%、4.8%,说明观测资料较完整。选取具有代表性的三个区域——浦东新区(这里不包括南汇地区)、中心城区和松江地区作为研究对象。

表 1　各区域观测资料的缺测率

Table 1　The unobserved rate of observations in each region of Shanghai

区域	缺测时次/h	缺测率/%
中心城区	953	10.8
浦东	1 320	15.0
闵行	899	10.2
嘉定	1 304	14.9
金山	129	1.5
松江	218	2.5
南汇	191	2.2
崇明	2 193	25.0
宝山	104	1.2
青浦	183	2.1
奉贤	1 095	12.5
长兴	158	1.8
横沙	469	5.3

2　观测资料的空间质量控制方法

目前常规地面站下设置的自动站是有人工定时检测观测设备运行状态的,相对来说,数据出现错误的概率较低,而其他自动站则缺乏定时维护,可能会出现错误的数据,同时本文采用的原始气温资料未考虑微气象误差等,此外在逐一分析站点时发现确实有个别的自动站点与邻近的站点有较大差异,因此需要作进一步的空间质量控制。

对于孤立的错误资料,空间一致性检查是极为有效的质量控制方法,本文采用 Barnes 客观方法(Barnes,1964)进行站点排查。该方法计算简单快速,适用范围广,是大气科学研究和应用中常用的插

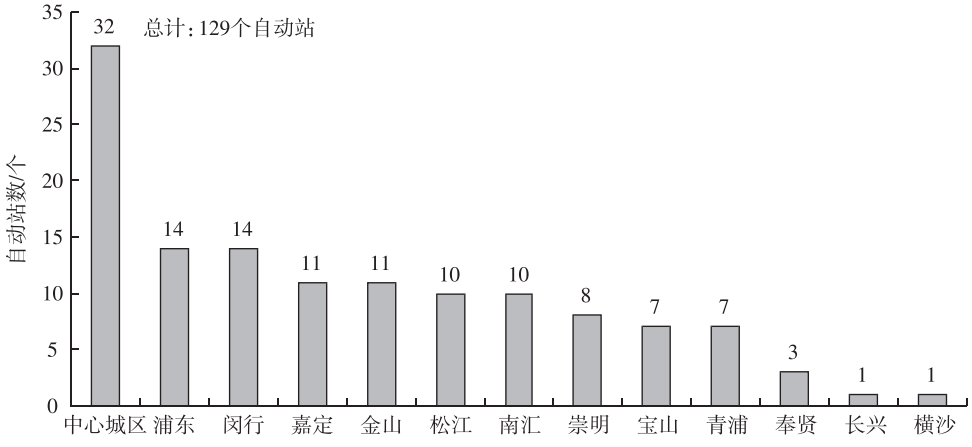

图 2　上海各区域的自动站点总数

Fig.2　Amount of AWSs in each region of Shanghai

值方法之一。本文主要将待测站插值后与自身的原始资料比较,误差大于一定范围(本文综合考虑了国内空间一致性检查所用的阈值(孙娟和胡平,2009;郭静,2011)),这里假定温差的绝对值大于等于 5 ℃)时即可剔除,为避免影响半径内其他站点有误而造成待测站的误差,在有限范围内选取尽可能多的测站。具体方法主要应用 Barnes 方法的第一步,即形成任一站点的初估值 $F_o(k)$:

$$F_o(k)=\frac{\sum_{i=1}^{N}W_iF(i)}{\sum_{i=1}^{N}W_i}。$$

其中:

$$W_i=\exp\left[-\left(\frac{r_i}{R}\right)^2\right],\text{当 } r_i\leqslant R;$$

$$W_i=0,\text{当 } r_i>R。$$

$$r_i^2=(R_0\arccos(\sin(\varphi_k)\sin(\varphi_i)+\cos(\varphi_k)\cos(\varphi_i)\cos(\lambda_k-\lambda_i)))^2+(h_k-h_i)^2。$$

其中:$F_o(k)$ 为待测站 k 的初估值;$F(i)$ 为待测站周围的第 i 个测站的观测值;W_i 为第 i 点的权重函数;R 为影响半径;r_i 为待测站 k 点与第 i 个测站的距离;φ 为纬度;λ 为经度;h 为海拔高度;R_0 为地球半径;N 为测站数。

2.1 Barnes 方法对上海自动站的质量控制

对观测期间内的上海自动站气温资料质量控制时,定义初始影响半径为 2 km,在影响半径内必须有大于等于 5 个测站,否则以增加 0.5 km 的形式扩大影响范围,通过 Barnes 方法插值后滤去一些误差较大的个别站点。个别站点主要集中在相同时刻相同站点上,这可能与自动站仪器出现故障未能及时维护有关,导致资料有一定的偏差,在初步的质量控制中未能剔除。由图 3 可见,该日无天气过程,从 00 时到 18 时,98609 测站与其余测站的气温变化较一致,从 19 时起,该站表现极为异常,通过验证发现该站及附近并无降水、大风等气象条件的影响,可以判断数据有误。通过空间一致性的质量控制,共滤去了 346 个站点数据(含所有时刻),进一步保证了所研究的观测资料的可靠性。

2.2 Barnes 方法的适用性

华东地区共有 27 574 个自动站点,采用上述 Barnes 方法对 2012 年 4 月 24 日 08—19 时的逐时自动站气温资料进行质量控制。由于华东站点分布相较上海站点稀疏,这里定义初始影响半径为 10 km,在影响半径内必须有大于等于 5 个测站,否则以增加 1 km 的形式扩大影响范围。插值后每个时刻平均滤去 317 个站点(无剧烈天气影响),详见表 2;同时将剔除站数最多与最少的时刻比较,发现有

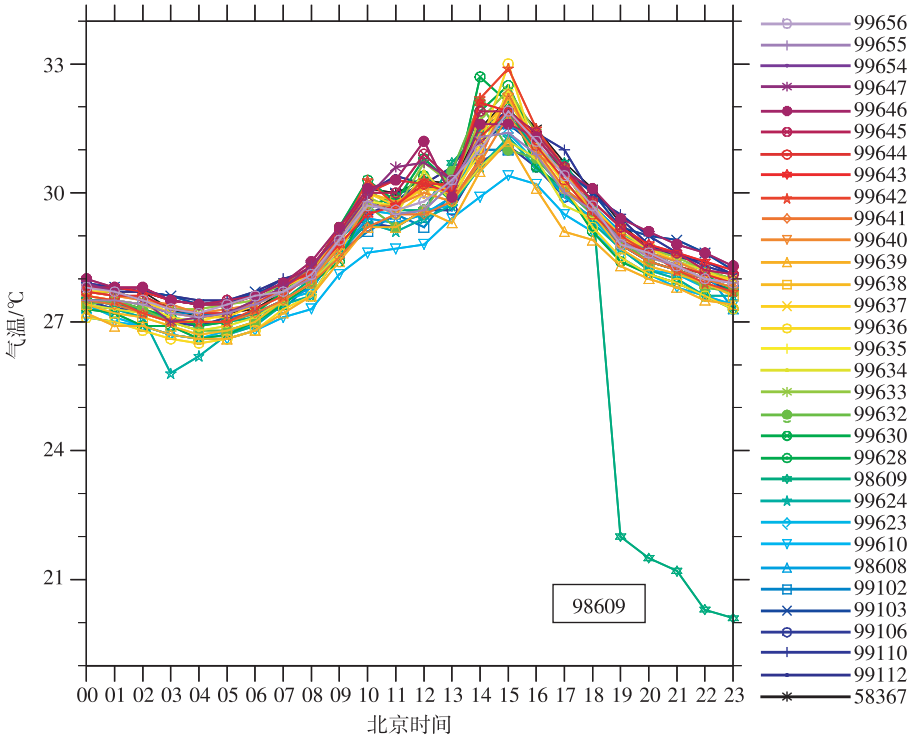

图 3 2011 年 7 月 13 日中心城区所有自动站点气温的日变化(单位:℃)

Fig.3 Daily change of air temperature at all AWSs in the central city on 13 July 2011(units:℃)

误站点并非固定站点。上述说明,Barnes 方法对自动站空间一致性质量控制效果较好,在华东地区具有一定的适用性。

表 2　2012 年 4 月 24 日华东自动站每小时有效站数和剔除站数

Table 2　The hourly amount of effective station and removed station in East China on 24 April 2012

北京时间	有效站数	剔除站数	北京时间	有效站数	剔除站数
08:00	19 592	377	14:00	21 693	308
09:00	19 303	351	15:00	21 843	294
10:00	19 002	344	16:00	19 750	294
11:00	21 231	350	17:00	18 439	297
12:00	17 663	290	18:00	20 313	290
13:00	21 672	329	19:00	20 105	286

3　结果分析

3.1　非降水日气温特征

浦东新区地理位置特殊,南面与南汇、闵行接壤,西面与中心城区、宝山隔黄浦江相望,北与崇明隔长江相望。图 4 为该区域的自动站点分布,其中 5 个为海边站点。比较非降水日(浦东新区 366 d 内 212 d 基本无降水)情况下,陆地站点和海边站点的逐时平均气温(图 5a),可以看出,气温具有显著

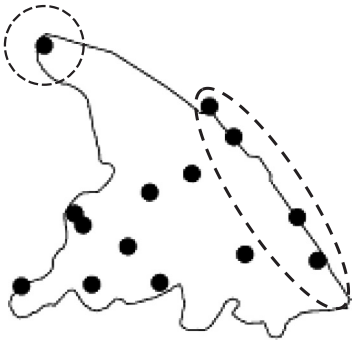

图 4　浦东新区自动气象站的分布(其中虚线所圈的站点为海边站点)

Fig.4　AWS distribution in Pudong(the seaside stations in circle with dashed line)

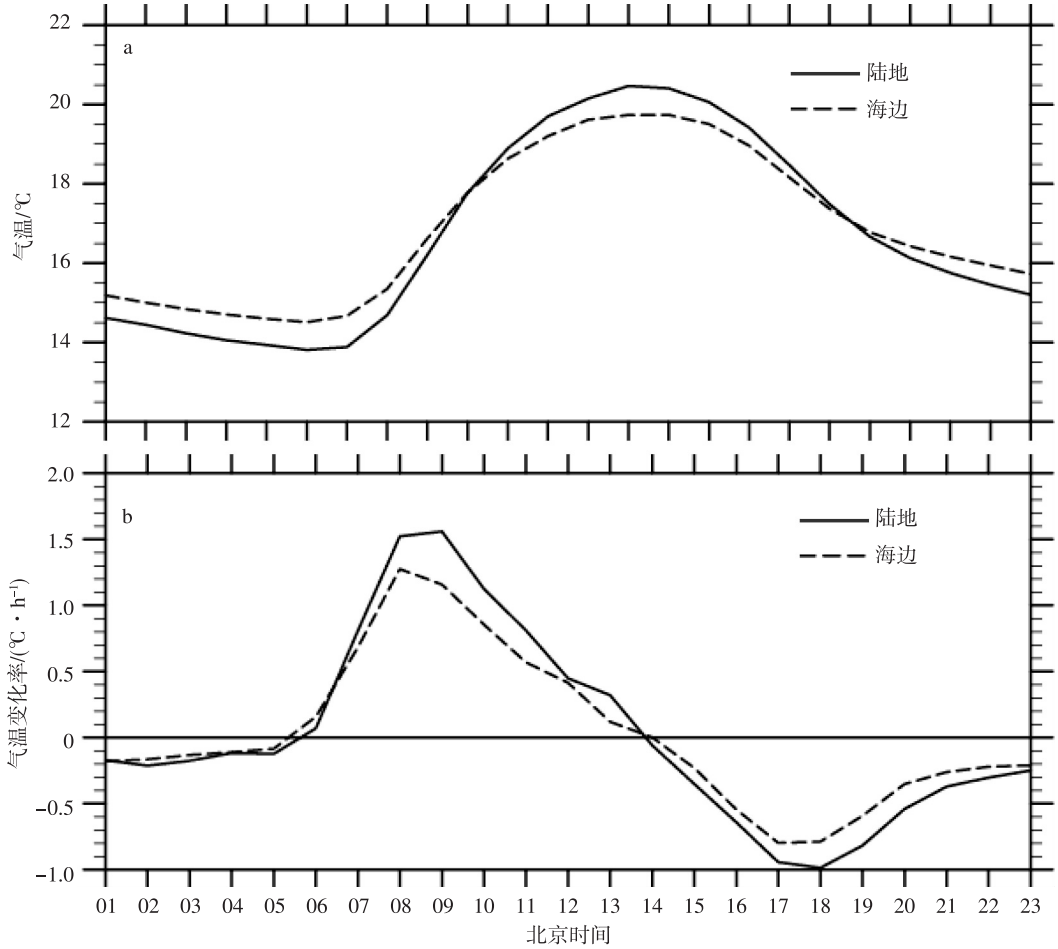

图 5　所有非降水日陆地站点与海边站点的逐时气温平均(a;单位:℃)和逐时气温变化率(b;单位:℃/h)

Fig.5　Hourly (a) average temperature(units:℃) and (b) temperature change rate(units:℃/h) of land and seaside stations without precipitation

的日变化特征,且两者气温由于海陆风的影响呈现差异。陆地站点热容量较小,导致白天陆地站点气温高于海边站点,13 时两者差异最大,约为 0.74 ℃,同时陆地站点(13 时)达到最高气温的时间稍早于海边站点(14 时);日落以后,陆地站点降温快于海边站点,18 时左右两者差异最小,辐射降温使得海边站点气温高于陆地站点,05—06 时左右达到一天中的最低气温,同时在 06 时左右差异最大,约为 0.79 ℃;日出后升温使得两者差异减小,09 时差异最小。从气温逐时变化率也可得到相同的结论(图 5b),陆地 13 时(海边 14 时)左右升温率由正转为负,出现日最高气温,随后开始降温,05—06 时降温率由负转为零,出现日最低气温,此外 09 时与 18 时分别是一日中逐时升温与降温最大的时刻。通过对两者差异进行逐时 t 检验,发现除 06—09 时、18 时外都达到了 0.01 显著性水平,说明海陆气温存在的差异较稳定,此外 09 时、18 时差异不明显也符合以上结论。

在非降水日情况下,导致两者日气温变化存在差异的原因是:1)太阳辐射差异。晴好天气与阴天的温度日变化有时会存在明显差异,前者表现出明显的海陆站差异,后者温度日变化趋于一致。从图 6 中连续两日的自动站气温逐时变化(箱线图显示的是数据分散情况)可见,8 月 8 日晴好天气,午后自动站之间的气温有较大不同,14 时气温最大相差 4 ℃,陆地平均温度高于海边 2 ℃,而 8 月 9 日阴天天气,午后海边温度稍高于陆地,所有站点的温度差异较小,符合海陆热力效应原理。2)与海风有较好的相关。根据大气动力学原理,不考虑科氏力影响时运动方程为 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}+KV=(T_a-T_b)\frac{R}{L}\ln\frac{p_0}{p_1}$。可知,海陆风与海陆温差有较大的关联。海陆风的影响程度分为 3 种情况(李庆宝等,2008):1)明显的海陆风。即夜间为陆风,早晨陆风减小,并逐渐转为海风,午后海风最大,傍晚再转为陆风。2)有海陆风影响,但不十分明显。如白天陆风减小或海风增大;或风速变化不大。3)基本无海陆风影响。即风向风速都变化不大。图 7 为 7 月 25 日海陆站点平均气温的逐时变化率。可见,海边站点从 12 时后开始降温,到 13 时气温迅速下降,其中 98613、98606 站点 1 h 降温幅度分别为 2.5、1.0 ℃,而陆地站点从 15 时开始降温。当日的天气晴好,无天气过程。但从两海边站的风速、风向变化(图 8)可见,气温在 13 时陡降与海风有较好的相关。98613 自动站点(图 8a)13 时由原先 12 时的 3 m/s 南风迅速增大并转向为 6 m/s 的东南偏东风,致使气温 1 h 内降低 2.5 ℃;98606 自动站点(图 8b)也有类似的结果,只是在偏东风作用下,呈阶梯式降温 2 ℃/(3 h)。

3.2 与天气过程的比较

为了检验自动站的灵敏性和资料的可靠性,对观测期间内降水较多时段的气温、降水资料进行比较。选取的降水日共 23 d,每日都有短时强降水(至少有 1 h 降水量超过 5 mm)。结果表明,自动站气温变化与降水的发生有很强相关性,反应灵敏(图略)。图 9 为 8 月 12 日气温和降水的日变化情况。由图 9a 可见,早上有两段明显的气温骤降过程,这与受较强雷暴云团影响产生两阵短时强降水过程(图 9b)有关,随着降水减弱停止,在日照作用

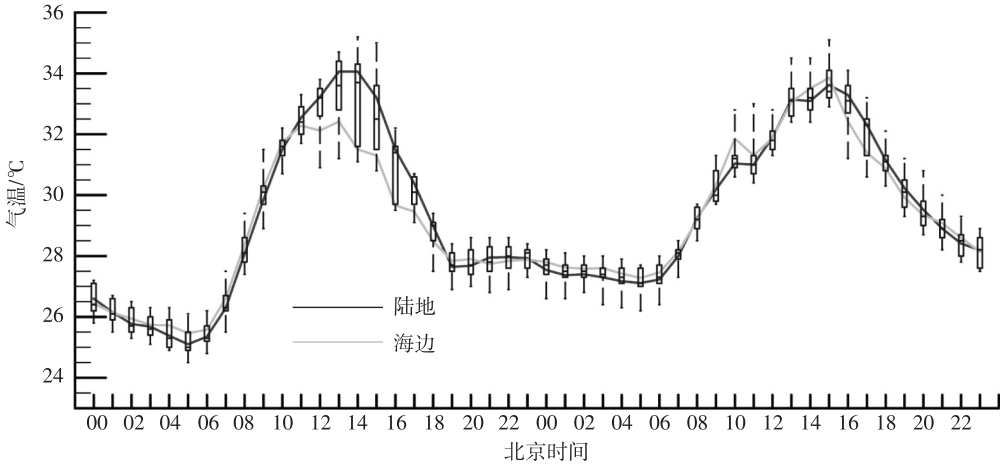

图 6 2011 年 8 月 8 日(晴天)与 9 日(阴天)逐时气温变化(单位:℃;其中箱线图为所有海陆站点的气温分布)

Fig.6 Hourly temperature variations on 8(clear day) and 9(cloudy day) August 2011(units:℃;the box plot for temperature distribution of all seaside stations)

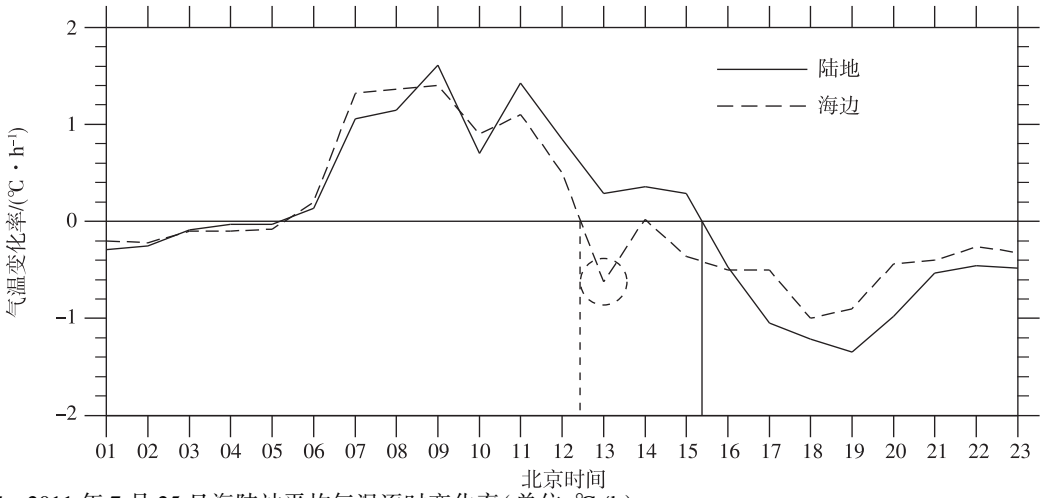

图 7　2011 年 7 月 25 日海陆站平均气温逐时变化率(单位:℃/h)

Fig.7　Hourly change rate of average temperature of land and seaside stations on 25 July 2011(units:℃/h)

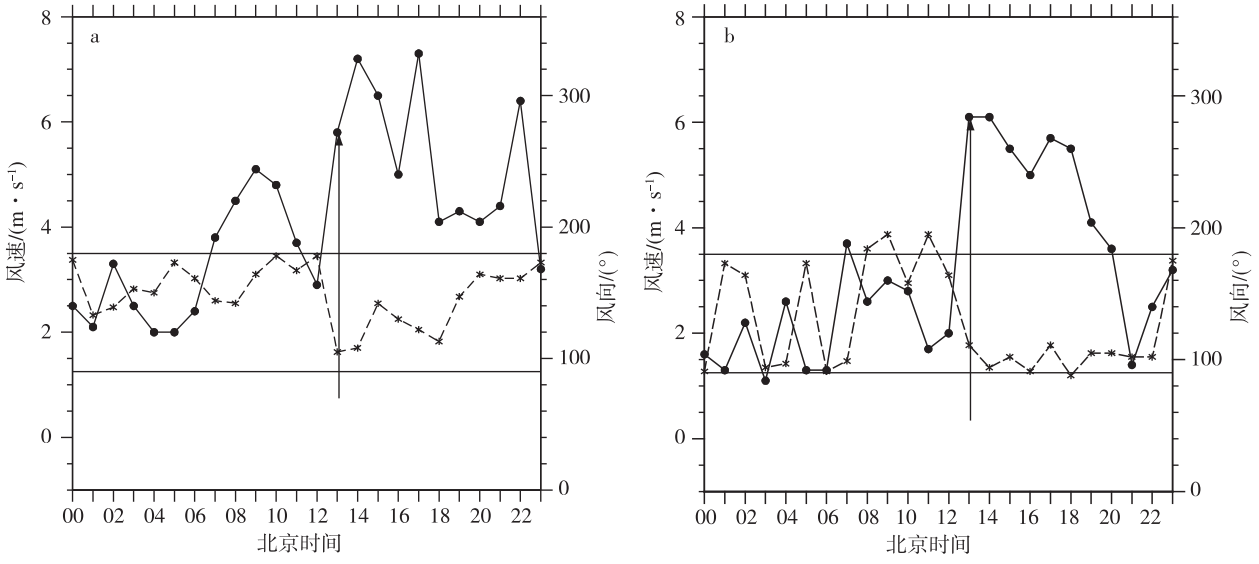

图 8　2011 年 7 月 25 日浦东海边站 98613(a)和 98606(b)的风速(实线;单位:m/s)、风向(虚线;单位:(°))逐时变化

Fig.8　Hourly changes of wind speed(units:m/s;solid lines) and direction(units:(°);dashed lines) of seaside stations (a) 98613 and (b)98606 in Pudong on 25 July 2011

下,气温逐步升高,16 时达最大。这说明自动站资料能够充分反映有天气过程时气象要素的变化特征,灵敏度可信。

3.3　城市热岛效应

在高强度的经济活动下,气温变化有着显著的局地特征,城郊下垫面温差逐步扩大,城市热岛效应非常明显。周淑贞和张超(1982)对上海城市热岛现象进行研究,认为上海测站出现城市热导效应。但与 20 世纪 80 年代相比,当前的土地利用类型已发生明显改变(黎治华等,2011)。近年来,松江、浦东地区城市化进程加速,但相对中心城区,建筑物密度仍然较小,下垫面性质的改变较少。这里选取中心城区、松江地区(远郊)、浦东新区(近郊)平均气温的日变化(图 10)进行研究。可见,在基本无降水的天气下(共 191 d),中心城区的气温总体高于松江、浦东地区,白天中心城区与松江的差异(简称中松差异)较小,06 时左右两者温差达到最大(1.48 ℃)。两者差异的逐时 t 检验表明,除 12—17 时外,均通过 0.01 信度的显著性检验,说明热岛效应呈现明显的日变化,夜晚强、白天弱。中心城区与浦东的差异(简称中浦差异)也有类似结论,两者差异的逐时 t 检验表明,除 08—10 时外均通过 0.01 信度的显著性检验。比较发现,中浦差异不如中松差异明显,主要原因在于浦东受到海陆风的影响。此外,后

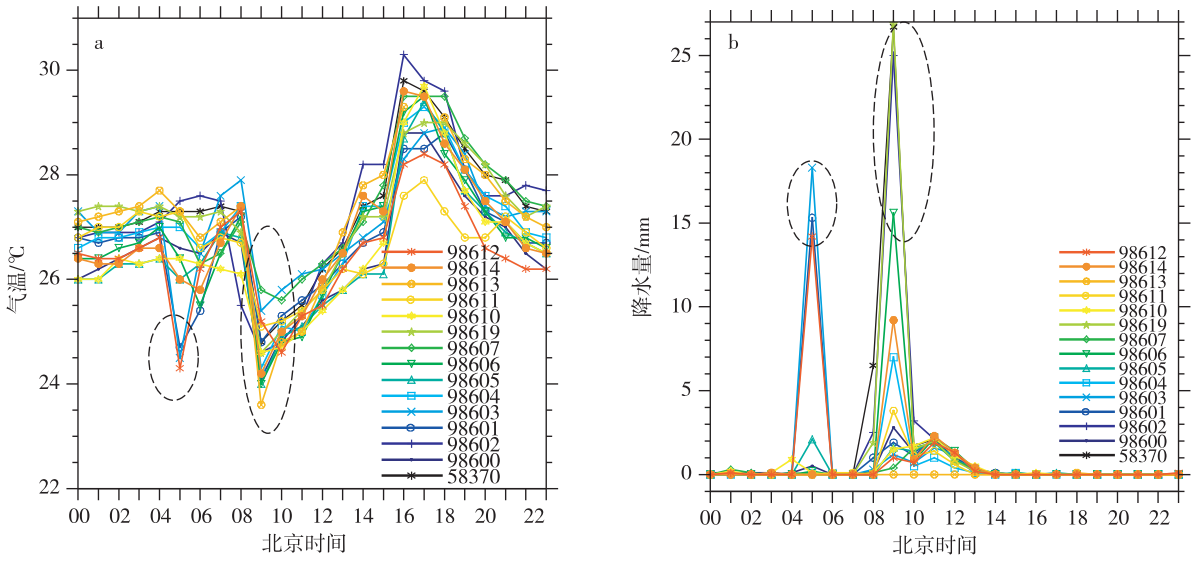

图 9 2011 年 8 月 12 日浦东自动站气温(a;单位:℃)和降水量(b;单位:mm)的日变化

Fig.9 Daily changes of (a) temperature (units: ℃) and (b) precipitation (units: mm) of AWSs in Pudong on 12 August 2011

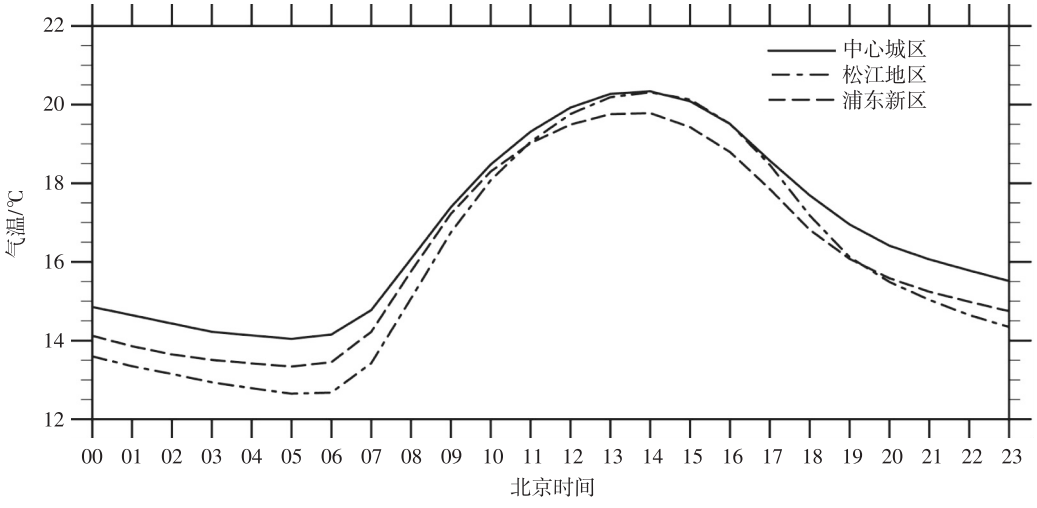

图 10 非降水日中心城区(实线)、松江地区(点划线)和浦东新区(虚线)自动站平均气温的日变化(单位:℃)

Fig.10 Daily change of average temperature of AWSs in central city (solid line), Songjiang (dash-dotted line), Pudong (dashed line) without precipitation (unit: ℃)

半夜城郊温差随时间相对稳定,这是因为热岛效应成为了主要的气温控制因素。日出后 07—08 时,松江(浦东)的升温率大于中心城区(图略),主要原因是:1)早晨太阳高度角较低,由于建筑物的阻挡,城市太阳辐射相对郊区较弱;2)城市空气中悬浮颗粒比郊区较多,能到达的辐射比郊区较弱(邓莲堂等,2001)。由于这两个原因使该时间中心城区的辐射相对较弱,从而导致中心城区与松江、浦东间的温差迅速减小。总之,城市热岛效应分析结果表明自动站观测资料在合理范围内。

4 结论

为满足和适应日益高涨的气象服务需求,高分辨率的观测资料是必不可少的,除了用于研究和预报中小尺度、短时效天气,还可以应用于资料同化方面,因此对于自动站观测资料的质量检查显得尤为重要。本文选取 2011 年 7 月 1 日 00 时至 2012 年 6 月 30 日 23 时逐时自动站气温资料来研究观测资料的可靠性。主要通过 Barnes 插值方法进行空间一致性质量控制,剔除个别问题站点,同时发现 Barnes 插值方法在华东地区有一定的适用性。此外,主要

对上海有代表性的区域——浦东、中心城区和松江地区进行资料分析,结果如下:

1)非降水日情况下,陆地站点和海边站点的气温具有显著的日变化特征。每日 09 时与 18 时左右两者之间差异最小;白天(夜晚),陆地(海边)站点气温高于海边(陆地)站点,最高(低)气温差异约为 0.74 ℃(0.79 ℃);多数时刻海陆差异通过 0.01 信度的显著性检验。此外,海陆日气温变化曲线不同的原因与日照、风向风速相关。

2)自动站资料能够充分反映出有天气过程时气象要素的变化特征,灵敏度可信。

3)自动站观测资料能够体现城市热岛效应。

由于本文所用资料样本较少,故由此所得统计结果的代表性、可靠性有待进一步验证。此外,Barnes 方法用于空间一致性质量控制效果较好,但是将其用于整个华东地区时机时耗费较大,有待通过分省质量控制,以提高效率。

参考文献:

邓莲堂,束炯,李朝颐.2001.上海城市热岛的变化特征分析[J].热带气象学报,17(3):273-280.

窦以文,屈玉贵,陶士伟,等.2008.北京自动气象站实时数据质量控制应用[J].气象,34(8):77-81.

郭静.2011.加密自动站资料的质量控制及其变分同化试验[D].南京:南京信息工程大学.

李庆宝,苗世光,孙桂平,等.2008.青岛奥帆赛场不同背景条件下的海陆风特征[J].气象,34(S1):54-63.

黎治华,高志强,高炜,等.2011.上海近十年来城市化及其生态环境变化的评估研究[J].国土资源遥感,23(2):124-129.

刘小宁,鞠晓慧,范邵华.2006.空间回归检验方法在气象资料质量检验中的应用[J].应用气象学报,17(1):37-43.

刘宇,陈泮勤,张稳,等.2006.一种地面气温的空间插值方法及其误差分析[J].大气科学,30(1):146-152.

任芝花,赵平,张强,等.2010.适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J].气象,36(7):123-132.

孙娟,胡平.2009.上海自动气象站实时质量控制系统研究[J].气象水文海洋仪器,26(4):38-41.

陶士伟,徐枝芳.2007.加密自动站资料质量保障体系分析[J].气象,33(2):34-41.

王海军,杨志彪,杨代才,等.2007.自动气象站实时资料自动质量控制方法及其应用[J].气象,33(10):102-109.

王新华,罗四维,刘小宁,等.2006.国家级地面自动站 A 文件质量控制方法及软件开发[J].气象,32(3):107-112.

辛跳儿,李军,贺千山,等.2009.上海地区城市和郊区气温差异特征分析[J].大气科学研究与应用(1):10-17.

熊安元.2003.北欧气象观测资料的质量控制[J].气象科技,31(5):314-320.

周淑贞,张超.1982.上海城市热岛效应[J].地理学报,37(4):372-382.

Barnes S L.1964.A technique for maximizing details in a numerical weather map analysis[J].J Appl Meteor,3(4):396-409.

Luo Z,Wahba G,Johnson D R.1998.Spatial temporal analysis of temperature using smoothing spline ANOVA[J].J Climate,11(1):18-28.

Snell S E,Gopal S,Kaufman R K.2000.Spatial interpolation of surface air temperatures using artificial neural networks:Evaluating their use for downscaling GCMs[J].J Climate,13(5):886-895.

World Meteorological Organization.2004.Guidelines on quality control procedures for data from Automatic Weather Stations[R].

(责任编辑:倪东鸿)