

李琴,周国兵,邓承之,等.基于相似天气现象的重庆市逐时气温预报技术研究[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):106-113.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于相似天气现象的重庆市逐时气温预报技术研究

李 琴,周国兵*,邓承之,胡春梅,张 勇

(重庆市气象台,重庆 401147)

摘 要:利用重庆市 2003—2017 年 34 个国家级气象观测站的逐时降水和逐时温度资料,建立了一种基于未来 24 h 日最高、最低气温和天气现象预报值的逐时气温预报模型。该模型通过搜寻与未来 24 h 预报值相似的历史天气现象下的气温时间序列,预报给定站点未来 1 d 的逐时气温。然后运用结合了高程的反距离加权插值法,得到重庆市 0.125°×0.125°分辨率逐时气温网格预报产品。2018 年逐时气温预报产品的检验结果表明,整体上国家级站点绝对误差≤2℃的逐时气温预报准确率为 79.73%~91.40%,均值为 87.12%;10 月—次年 2 月的准确率好于 3—9 月,8 月较差。该模型的预报性能在无雨时稳定,有雨时在地形复杂且易出现强降水的重庆东北部地区略差。重庆西部、中部的大部以及东北部偏西地区的网格产品预报准确率较高,而偏南局地山区和偏东部分山区的准确率较低。总体上该方法预报效果较好,预报性能稳定。

关键词:逐时气温预报;相似天气现象;复杂地形;插值

中图分类号:P457.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)02-0106-08

气温变化与电力负荷、冬季采暖能耗、交通运输、农牧业和旅游业等人类生活与生产活动密切相关^[1-3]。随着社会的发展,政府和公众对气象服务的需求日益增高,在获取常规的日最高、最低气温的同时,还希望能及时获得高精度或连续滚动的定时、定点及定量气温预报信息。气温作为常规天气预报的主要内容之一,其预报方法的研究长期以来为广大气象工作者关注^[4-6]。在实际工作中精细化预报已成为气象业务发展的必然趋势。目前,逐时气温的预报方法主要有:经验预报、统计预报和数值预报。结合

统计方法和预报员主观经验,基于日较差分级的北京地面逐时气温预报模型有一定的推广价值^[9],然而其自动化程度和预报准确率难以满足当前多层次、全方位及系列化的气象预报服务需求。由于模式与实际之间的地形高度差异存在一定的系统误差,数值模式的气温预报能力受到限制^[7-9]。近年来,全球范围内掀起了深度学习热,人工智能方法兼具数值预报和统计预报的优点,在未来有潜力大幅提高逐时气温的预报准确率和时效性,但该方法投入业务应用还需要一定的时间^[10]。

基于海量历史观测资料,相似预报法可在一定程度上弥补数值预报和统计预报的不足。在实际观测中,固定观测点的某类天气现象的天气背景和形成条件往往相似,因此可筛选出历史相似过程作为制作固定观测点逐时气温预报的借鉴。尽管这种相似天气现象背景下的预报系统看似“黑匣子”,缺乏对相关天气物理过程的精准量化,然而该系统筛选出的历史最相似气温变化过程中已包含各种非线性

收稿日期:2021-09-15;修回日期:2022-01-05

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项(CSTC2019jsex-tjshx007);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033);重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-201906)

作者简介:李琴(1988—),女,工程师,主要从事短期天气预报研究。
E-mail:liqin990@163.com

通信作者:周国兵(1973—),男,正高级工程师,主要从事短期天气预报和环境气象预报研究。E-mail:zhou-gh@163.com

因素的综合作用。在计算机运算能力不断提高和气象观测资料成倍增长的情况下,该方法能充分利用与真值最接近的气象观测数据,输出高分辨率的定点预报产品。相似预报法能满足精细化预报需求,适合投入业务预报中使用。

目前,已有学者将相似预报法应用于降水、云量和能见度等气象要素的预报^[11-13],但该方法还较少应用于逐时气温预报。重庆地处西南,位于长江上游,西接四川盆地,东北部雄踞大巴山地,东部及南部斜贯有巫山、七曜山、大娄山和武陵山(图 1a)。重庆境内山脉众多,江河纵横,地势沿山脉和河流起伏,海拔落差较大,地形地貌十分复杂。同时,重庆受热带季风、副热带季风和高原热力作用等多重气候系统影响,天气气候异常复杂。重庆是中国著名的“火炉”城市。2003—2018 年,重庆大部分地区的夏季平均气温为 26~29℃,除黔江、酉阳、秀山和城口外,其他站的小时气温极大值 $\geq 40^\circ\text{C}$,云阳最大,为 43.9℃(图 1b)。夏季频发的高温热浪天气会严重危害居民健康,也对室外生产或作业产生一定影响,如电力行业的电力负荷和用电量对气温变化极为敏感^[3]。由于缺乏对各数值模式预报性能的精细化检验,重庆逐时气温预报仍以主观经验预报为主,业务中缺少客观定量的技术支撑。因此,探索复杂地形下重庆逐时地面气温准确而有效的预报方法,对当地人民生活和社会经济都有重要科学价值和现实意义。基于在历史数据库中搜寻相似天气下的气温序列,本文构建了一套逐时气温预报模型,选取重庆(图 1a)为研究区域,输出 $0.125^\circ\times 0.125^\circ$ 分辨率的逐

时气温网格预报产品,并对产品进行检验,以期为重

1 资料与方法

1.1 资料

为了建立重庆市国家级气象观测站逐时气温预报模型和检验其预报效果,使用 2003—2018 年重庆市 34 个国家站(图 1b)的逐时气温和逐时降水数据。2003 年 1 月 1 日 00 时(北京时,下同)—2018 年 12 月 31 日 23 时各站应测 140 256 条逐时资料。各站逐时记录的起始时间并不完全相同。璧山和潼南的起始时间较晚,其数据缺测率分别为 31.3% 和 24.0%;多数测站记录始于 2003 年 6 月 2 日 00 时,其数据缺测率均 $\leq 18.1\%$ 。为了充分使用观测数据且最大程度地保持数据的真实性,本文从 2003 年 1 月 1 日 00 时开始将各站缺失记录的时次补为缺测,并设定缺测不参与计算。然后采用气候极值检查和台站极值检查等方法对数据进行初步的质量控制,并建立以 20 时为日界时的数据库。同时,基于 2016—2018 年 $0.125^\circ\times 0.125^\circ$ 分辨率的 EC 逐月地面资料、高空数据和地形数据,建立了重庆市逐时气温网格预报模型。此外,网格产品预报准确率的检验还使用了 2018 年重庆市加密自动气象观测站的逐时气温资料。

1.2 重庆市国家级气象观测站逐时气温预报模型

气温具有典型的日变化特征。晴天和多云天的气温日变化规律性强,最高、最低气温出现时间较为集中,多为午后或凌晨;而该特征在有雨天则受降水

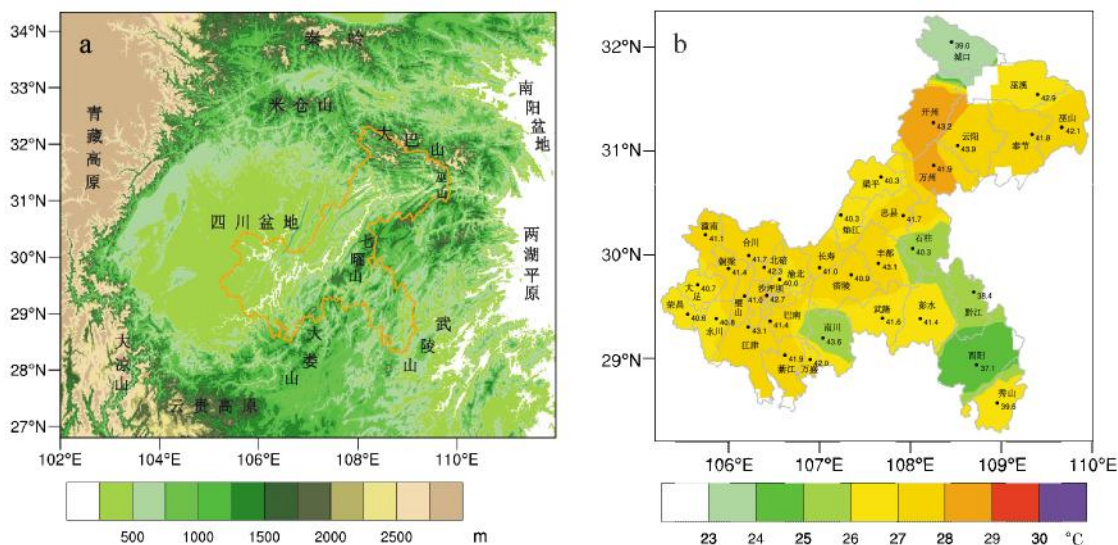


图 1 重庆及周边地区地形高度(a,填色,橙色轮廓表示重庆)和 2003—2018 年 6—8 月(b)重庆市平均气温(阴影)和国家级气象观测站的小时气温极大值(数字,单位:℃)

强度、冷空气到达和结束时间影响,最高、最低气温出现时间均较为分散,气温日变化规律性差^[14]。鉴于这一情况,本文旨在实现一种基于相似天气现象的逐时气温预报模型(图2)。

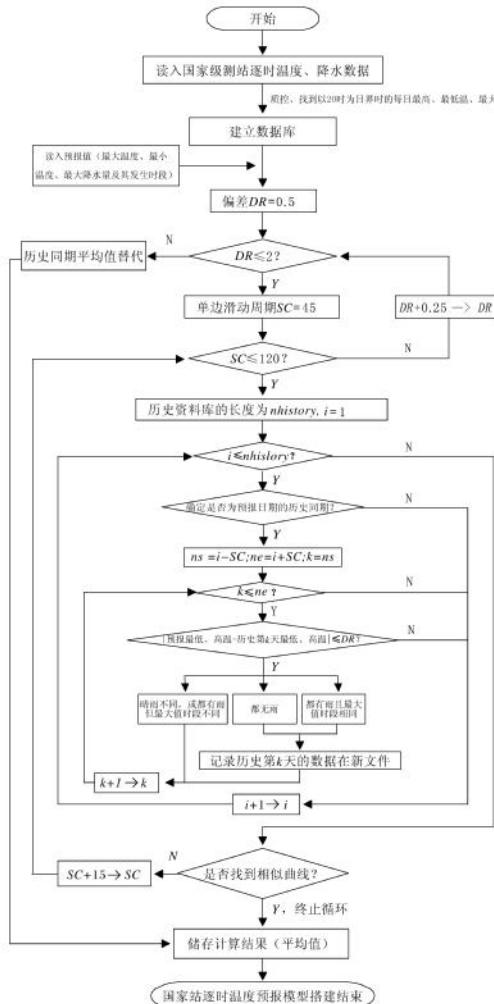


图2 基于相似天气现象的重庆市国家级测站逐时气温预报模型的计算流程

基于逐时气温和逐时降水实况资料库,寻找历史上与预报日(F 天)日期接近,天气现象类似且日最高、最低气温值接近的案例。将满足条件的案例日气温进行平均,作为 F 天的逐时气温预报;若没有满足条件的案例日,则采用 F 天的历史均值作为逐时预报值。将天气现象划分为无雨(包括阴天、多云和晴天)和有雨两种类型。某天只要有一个 ≥ 0.1 mm/h的小时降水,则定义为有雨天,反之为无雨天。若 F 天与历史上某天 H 的最高、最低气温绝对误差都在温度偏差允许范围(DR)内,同时, F 天和 H 天均为无雨天,或者 F 天和 H 天都为有雨天且两者最大小时降水发生时段相同,则将 H 天的逐时气温曲线视为 F 天的历

史相似气温曲线。 DR 初值设定为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到气温日变化的季节特征, H 天的滑动范围设定为历史上对应 F 天日期的前后 SC 天, SC 初值为 45 d 。为了保障能尽量多地找到相似案例,若在当前的偏差范围和日期滑动范围内未找到符合条件的样本,则迭代增加 SC 和 DR , SC 终止值为 120 d , DR 最大为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 复杂地形下逐时气温预报产品的网格化方法

局地地形的海拔、坡度、坡向和遮蔽度等特征与温度空间分布紧密相关^[15]。因此,在将站点温度格点化的过程中,利用气温与地理环境要素(如海拔)的关系建模是实现高精度气温插值的关键。鉴于重庆地形复杂(图1a),基于重庆市国家站逐时气温预报模型的结果,本文运用结合了高程的反距离加权插值法,得到较高分辨率的逐时气温网格预报产品。该插值方法在距离权重的基础上,进一步考虑了气象要素随海拔的变化能较好地刻画温度随地形变化的特性^[16],其计算公式如下^[17]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_i + \beta_i \cdot z_i}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\alpha}} - \beta \cdot z \quad (1)$$

式中, T_i 、 β_i 和 z_i 分别为待估点周围第 i 个站点的气温、气温递减率和海拔; d_i 为待估点与第 i 个站点的距离; β 和 z 分别为待估点的气温直减率和海拔; n 为用于插值的站点数,通常取为最近的几个站点或一定搜索半径内的站点;加权幂指数 α 可以调节插值函数曲面的形状, α 越大(小),在节点处函数曲面越平坦(尖锐), α 通常取2或3,这里取2。

近地表气温直减率是推测近地面气温空间分布的重要参数^[18]。温度直减率是大气温度随高度变化而出现的递增或递减幅度,在对流层内,海拔每升高 $1\text{ }000\text{ m}$,温度平均下降 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而重庆气候和地形复杂,直接使用反映对流层平均状况的这一数值很难表征当地近地面气温直减率的季节和类型差异^[19]。同时,重庆唯一的探空站(沙坪坝)资料的温度递减率也缺乏代表性。因此,基于EC逐月数据,本文统计了重庆逐月近地面气温递减率。各月近地面气温递减率分布特征明显不同。11月—次年3月各地近地面气温递减率较低,其中东南部较其他地区低,为 $2.5\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;4—8月,重庆各地该物理量均增加;9月该物理量开始减小。

重庆逐时气温网格预报模型的计算流程:对于研究区域内的任一格点,首先确定参与该格点插值的参考站点,然后基于国家站的逐时气温预报结果、

逐月温度递减率和地形数据,运用结合高程的反距离插值法,预报出该格点的逐时温度。在参考站点的选取过程中,对于任一待插值的格点,本文以其为圆心设置一个初始值为1个格距(0.125°)的邻域半径,以该圆作为搜索领域,落在领域内的国家站作为参考站点。一旦在邻域半径内找到参考站点,则停止循环;否则整数倍递增邻域半径,直至在新邻域半径内找到参考站点。可见,邻域半径大小的设定是悬而未定的问题。重庆国家站分布西密东疏,因此邻域半径具有明显的区域性特征,整体上自西向东呈增大趋势(图3),在重庆东北部达到极大值,这会影响插值精度^[20]。此外,在插值过程中,本文采用的是离站点最临近的格点温度递减率代替站点温度递减率。

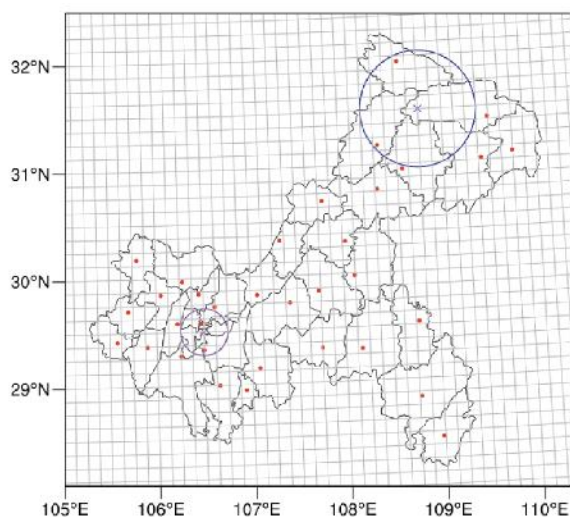


图3 重庆国家站及 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 分辨率的网格分布
(蓝色和紫色圆圈分别表示大、小邻域半径)

2 重庆市国家站逐时气温预报模型的应用与检验

基于2013—2017年重庆市34个国家级气象观测站逐时气温和逐时降水资料,建立了当地国家级站点逐时气温预报模型。那么其预报效果如何?下面利用2018年逐日的最高、最低气温和天气现象(有雨天还应包括最大小时降水出现时段)实况值作为预报值,通过该模型输出2018年每天的逐时气温预报值,以预报值和实况值为检验样本,从有无相似气温曲线、逐时气温预报准确率(定义为预报绝对误差 $\leq 2^\circ\text{C}$ 的小时数占总小时数的百分比)和均方根误差等方面对模型进行检验。相似气温曲线在一定程度上保障了预报气温日变化的地域差异和季节特征规律,预报准确率和均方根误差分别是衡量预报方法平均预报能力和稳定性的2个重要客观标准。

2018年各站能找到相似气温曲线的概率均较

大,开县最小,却也高达95.9%。对于未找到相似曲线的案例,如沙坪坝站2018年9月3日就采用9月3日这天的历史逐时气温均值为预报值(图4c)。分析发现,尽管某站在某天有相似曲线,但预报的逐时气温并不完全准确。可分为三种情况:第一,检验结果理想,沙坪坝/奉节站在2018年1月1日/7日均有多条相似曲线,每条相似曲线与实况曲线的绝对差值均 $< 2^\circ\text{C}$ (图4a、4d);第二,检验结果较理想,沙坪坝、奉节站分别在8月24日、1月10日(图4b、4e)均各有多条相似曲线,尽管少数相似曲线与实况曲线的绝对差值在部分时段 $> 2^\circ\text{C}$,预报结果却准确;第三,部分时段预报结果不准确,这是因为相似曲线数量少且部分时段预报结果偏差较大(图4f)。

因此,对2018年各站逐时气温预报准确率进行检验。在最高、最低气温和天空状况预报准确的前提下,整体上重庆国家站逐时气温预报准确率平均为87.12%,石柱最低(79.73%),永川最高(91.8%)(图5a)。有、无雨天气下,平均准确率分别为88.04%、86.96%(图5b),预报准确率 $> 85\%$ 的站次分别占总数的79.4%和61.8%。总体上预报效果较理想。就预报稳定性而言,各站的均方根误差为 $1.33\sim 1.91^\circ\text{C}$,均值为 1.57°C ,有、无雨天气时均值分别为 1.72 和 1.55°C ,预报性能稳定。无雨天气均方根误差最大值 1.86°C 出现在秀山,石柱次之(1.78°C),石柱在无雨时预报准确率最低,仅为79.03%。在有雨天气下,东北部巫山、开县和云阳等站的均方根误差较大,同时其预报准确率也较低。这可能与重庆东北部地区更加复杂的地形有关,大巴山脉南侧的坪坝河谷与高山的过渡区域多出现雨强大的小时降水^[21],强降水导致的冷池往往伴随着局地强降温过程^[22],极大地增加了逐时气温预报的不确定性。综上所述,该方法预报准确率高,预报性能稳定。

逐时气温预报准确率在整体上呈“W”型月变化特征(图6a)。10月—次年2月预报准确率均 $> 93\%$,3—9月明显偏低,8月最低(77.6%),5月次之(79.5%)。有雨天气的“W”型月变化特征更显著,8月准确率最低,仅为65.3%;4月次之,为73%。这可能与10月—次年2月气温日较差小、3—9月气温日较差大且多时空分布不均的强对流天气有关。重庆强对流天气多始于3月,4—8月是强对流天气的多发期,9月以后强对流天气明显减少^[23]。受西太平洋副热带高压控制,重庆8月常常遭遇强度大的连晴高温天气,也经常突发分散性强降水,从而8月逐时气温预报难度大。6月有雨时的预报准确率明

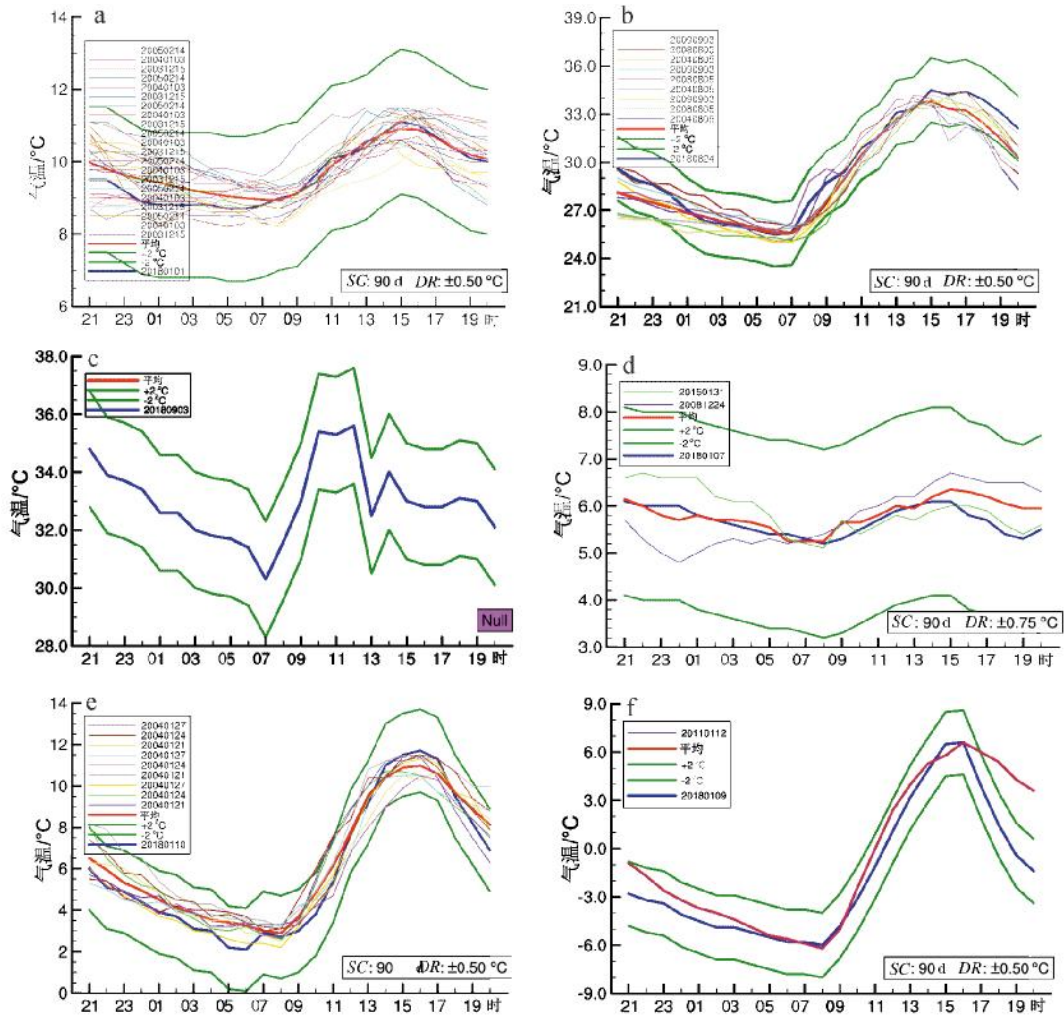


图4 沙坪坝站2018年1月1日(a)、8月24日(b)和9月3日(c),奉节站1月7日(d)和1月10日(e),城口站1月9日(f)逐时气温的检验效果

(蓝色粗实线为实况气温曲线,森林绿粗实线为实况气温 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 曲线,彩色细实线为历史相似曲线,红色粗实线为所有历史相似曲线的平均值,右下角的“SC”为2倍单边滑动周期(单位:d)，“DR”为温度偏差允许范围(单位: $^{\circ}\text{C}$),“Null”表示没有找到相似曲线)

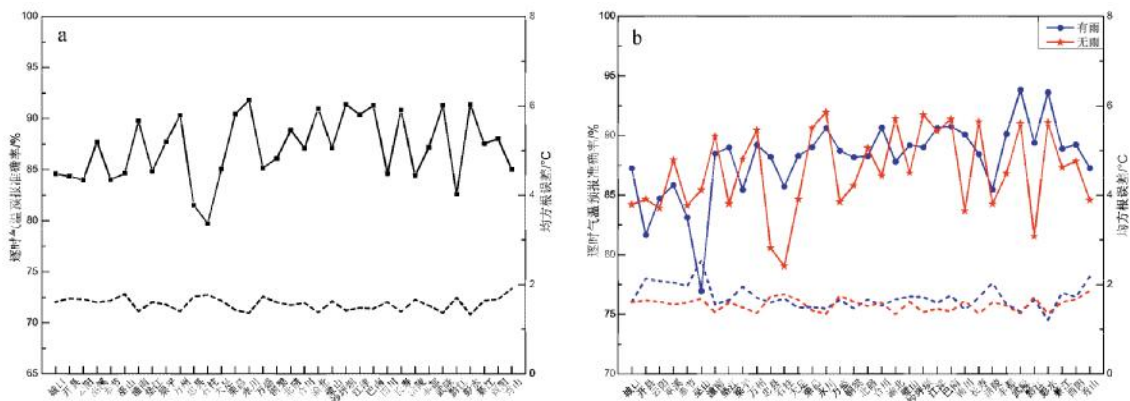


图5 2018年重庆市国家站在整体上(a,黑色)和有雨(蓝色)、无雨(红色)天气(b)逐时气温预报准确率(实线)和均方根误差(虚线)

显高于无雨时,这是因为重庆6月冷暖空气交汇比较频繁,多连阴雨天气^[23],天空状况稳定,气温变化

幅度小。整体上,逐时气温预报准确率日变化呈三峰型特征(图6b)。除21时外,其他预报时刻准确率

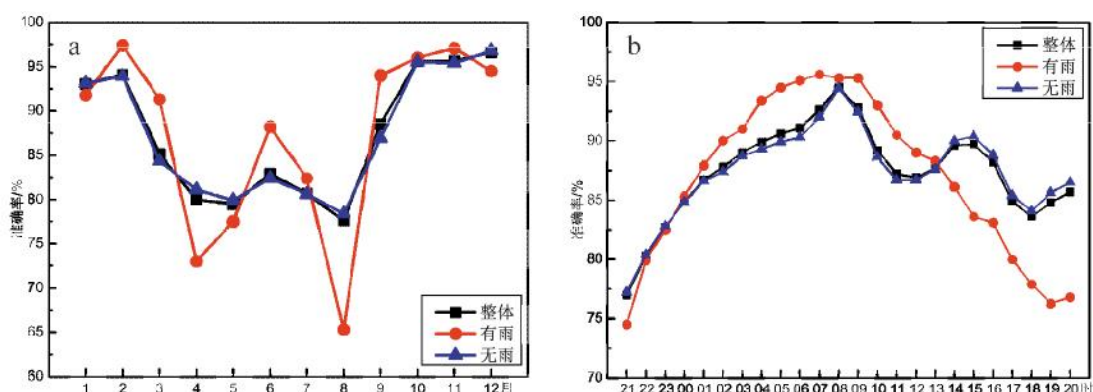


图6 2018年重庆市国家站在整体上(黑色)、有雨(红色)和无雨(蓝色)天气逐时气温预报准确率的月变化(a)和日变化(b)

都>80%,其中05—09时准确率较高,08时达94.5%,第二个峰值出现在14—16时。与日最低、最高气温最大出现概率时次相近的预报时刻的准确率较其他时刻偏高。有雨时,预报准确率日变化呈现单峰结构,峰值位于05—09时,而18—22时准确率<80%。14—21时,有雨时的预报准确率较无雨天气低2.7%~9.7%。值得注意的是,无雨天气气温预报准确率的日变化、月变化特征与整体特征十分相似,这是因为无雨的小时样本数远大于有雨样本数。

以上检验结果表明,基于日最高、最低气温和天气现象等预报值得到逐时气温预报产品的方法准确率较高,预报性能稳定,但其预报质量高度依赖于预报值的准确性,在一定程度上依赖于历史数据库时间序列长度。由于日最高、最低温度和天气现象的预报准确率不可能达到100%,实际应用中该方法的逐时气温预报准确率要比本文的检验结果低。国家站逐时气温预报方法在专业专项气象预报服务中有较好的实用性,具有一定的推广价值。

3 重庆市逐时气温网格预报模型的检验

根据《全国智能网格气象预报业务产品陆面基本要素预报检验办法》的规定,选择距离站点最近的格点预报值作为站点预报值,有多个距离相等的格点则取东北角格点,将重庆有逐时气温记录且分布较均匀的1923个测站(包括国家级和加密自动气象观测站)的预报值与实况值对比进行检验^[24],检验内容主要为绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的逐时气温预报准确率。总体上,重庆西部、中部的大部以及东北部偏西地区插值效果较好,准确率>55%,中西部部分地区甚至>70%,而偏南局地山区和偏东部分山区的预报效果较差(图7)。重庆的国家站多在西部经济发达且地形较平坦地区(图1a,图7),密度最大可达十几

公里一个站。重庆东部地形较为复杂,分布有大巴山、巫山和七曜山等众多高大山脉。受建站条件影响,东部山区国家站明显少于西部,且东北部的测站大多建立在地势较低的河谷地区^[21]。与陈峰等^[17]的研究结果一致,结合高程的反距离加权插值法在无资料或资料稀缺地区的插值误差较大。此外,山区近地面气温递减率的不确定性也在一定程度上影响了插值产品的准确率^[25]。

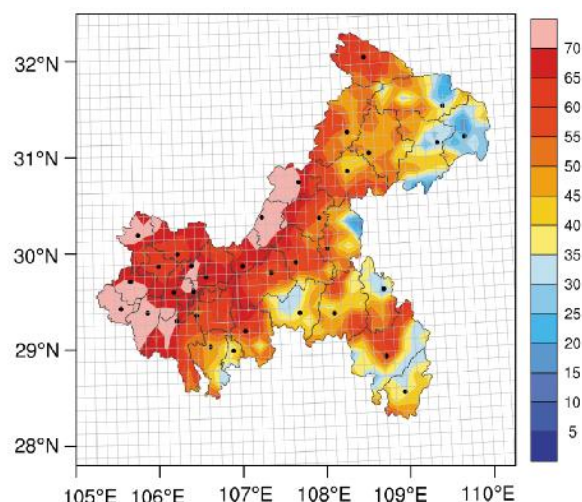


图7 2018年重庆逐时气温网格预报准确率(单位:%)

4 结论与讨论

使用重庆市2003—2017年34个国家级气象观测站的逐时气温和逐时降水资料,在相似的天气现象背景下,建立基于日最高、最低气温和天气现象等预报值的逐时气温预报模型。基于重庆国家级站点逐时气温预报产品、EC逐月数据和地形数据,运用高程的反距离加权插值法,通过开展逐时气温的网格化预报试验,得到重庆 $0.125^{\circ}\times 0.125^{\circ}$ 分辨率的逐时气温网格预报产品。采用2018年重庆国家站和加

密自动气象观测站的逐时气温对预报效果进行检验。得到结论如下:

(1)在最高、最低气温和天空状况预报准确的前提下,2018年重庆国家级站点在相似天气现象背景下能找到历史相似气温曲线的比例均 $\geq 95\%$,各站在整体上、有雨和无雨时逐时气温预报准确率分别为79.73%~91.4%、76.98%~93.82%和79.03%~91.96%,均值分别为87.12%、88.04%和86.96%。国家级站点在整体上和无雨时的均方根误差均 $< 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,模型在有雨时的预报稳定性略差,尤其是地形复杂且易出现强降水的东北部地区。

(2)重庆所有测站的预报准确率呈“W”型月变化。10月—次年2月预报准确率 $> 93\%$,受强对流天气影响,10月—次年2月的预报效果较3—9月好,8月准确率最低(77.6%)。有雨时,准确率的“W”型月变化特征更突出。8月有雨时预报效果欠佳,6月有雨时的预报效果优于无雨时。除21时外,该方法在其他预报时刻的准确率都 $> 80\%$ 。

(3)重庆西部、中部的大部以及东北部偏西地区的网格产品预报准确率较高,偏南局地山区和偏东部分山区的准确率较低。

考虑到气温日变化特征在有雨和无雨天气时的不同表现,本文建立的重庆市国家站逐时气温预报模型将24 h日最高、最低气温预报细化到逐时气温预报,还兼顾了气温日变化的地域差异和季节特征。总体来看,模型预报效果较好,预报性能稳定,重庆中西部部分地区网格化产品的预报准确率较高。但尚有待改进之处:首先,需扩展观测资料库,当某气象站没有历史相似曲线时,可从与其紧密相邻的其他部门(如电力、水文、林业和航空等)观测站数据库中搜索相似曲线,从而提高预报准确率。其次,在考虑高程对气温空间分布的影响时,需要优化格点温度递减率的计算^[16]。最后,需要验证其他插值方法在重庆的适用性。气象资料格点化是一项非常复杂的工作,已有学者系统介绍了各类空间内插方法的适用范围和优缺点,并指出没有绝对最优的空间内插方法^[26]。本文尚未证实结合高程的反距离加权插值法在重庆效果最佳,在未来仍需针对重庆地理特征对其他方法开展适用性验证,并对各类方法的参数进行改进以实现逐时气温的空间最优化插值。

参考文献:

[1] 陈彦求,李玉明,何爱欢,等.甘肃地区温度变化对 $\pm 100\text{ kV}$ 特高压直流输电工程线路的影响[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(2):84-88.

[2] 舒斯,曾琦,鲁静,等.沪渝高速(三岔口大桥)路面温度特征及模型研究[J].暴雨灾害,2016,35(4):378-385.

[3] 王丽娟,任永建,陈正洪,等.基于气温累积效应和炎热指数的夏季日最大电力负荷预测研究[J].气象与环境科学,2021,44(2):106-111.

[4] 薛志磊,张书余.气温预报方法研究及其应用进展综述[J].干旱气象,2012,30(3):451-458.

[5] 李淑娟,于晓晶,据陈相,等.DOGRAFS 温度和风场的预报检验[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(6):1-10.

[6] 张德山,窦以文,白钢,等.日较差分级的北京地面逐时气温预报[J].气象,1999,25(5):54-57.

[7] 沈晓燕,申燕玲,颜玉倩,等.不同地形高程数据对青海夏季气温和降水模拟准确度的影响[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(4):92-99.

[8] 齐铎,刘松涛,张天华,等.基于格点的中国东北中北部2 m 温度数值预报检验及偏差订正[J].干旱气象,2020,38(1):81-88.

[9] 玛依热·艾海提,希热娜依·铁里瓦尔地,杨利鸿.ECMWF 细网格2 m 温度预报产品在南疆西部温度预报中的释用[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(5):1-7.

[10] LIAO H S, WU Y C, CHEN L, et al. A visual voting framework for weather forecast calibration [C]//2015 IEEE Scientific Visualization Conference, Chicago, USA, 2015: 25-32.

[11] 李博,赵思雄,陆汉城,等.综合多级相似预报技术在暴雨短期预报中的检验[J].应用气象学报,2008,19(3):307-314.

[12] Hansen B. A fuzzy logic-based analog forecasting system for ceiling and visibility[J]. Weather & Forecasting, 2010, 22(6):1319-1330.

[13] 黄海亮,勒双龙,王式功,等.相似预报方法在山西省云量预报中的应用[J].干旱气象,2018,36(5):845-851.

[14] 王丹,高红燕,张宏芳,等.一种逐时气温预报方法[J].干旱气象,2015,33(1):89-97.

[15] 袁淑杰,谷晓平,缪启龙,等.贵州高原复杂地形下月平均日最高气温分布式模拟[J].地理学报,2009,64(7):888-896.

[16] MOHAMMADI S A, AZADI M, RAHMANI M. Comparison of spatial interpolation methods for gridded bias removal in surface temperature forecasts[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(4):791-799.

[17] 陈锋,董美莹,冀春晓.综合分析法在复杂地形气温精细格点化中的应用[J].高原气象,2016,35(5):1376-1388.

[18] 江净超,刘军志,秦承志,等.中国近地表气温直减率及其季节和类型差异[J].地理科学进展,2016,35(12):1538-1548.

[19] LI X P, WANG L, CHEN D L, et al. Near-surface air temperature lapse rates in the mainland China during 1962-2011[J]. Journal of Geophysical Research :

- Atmospheres, 2013, 118(14): 7505–7515.
- [20] 段平, 盛业华, 李佳, 等. 自适应的 IDW 插值方法及其在气温场中的应用[J]. 地理研究, 2014, 33(8): 1417–1426.
- [21] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 327–340.
- [22] 李琴, 邓承之. 重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析[J]. 气象, 2021, 47(9): 1073–1085.
- [23] 刘德, 张亚萍, 陈贵川, 等. 重庆市天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 151–153, 237–238.
- [24] 韦青, 代刊, 林建, 等. 2016—2018 年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J]. 气象, 2020, 46(10): 1272–1285.
- [25] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [26] 李月臣, 何志明, 刘春霞. 基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1019–1028.

Hourly Temperature Forecast Technology in Chongqing Based on Similar Weather Phenomena

LI Qin, ZHOU Guobing, DENG Chengzhi, HU Chunmei, ZHANG Yong
(Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China)

Abstract Based on hourly precipitation and hourly temperature data of 34 national meteorological observation stations in Chongqing municipality from 2003 to 2017, a forecast model for hourly temperature is established in this study. Through searching temperature time series in similar historical weather phenomena, this model is capable of hourly temperature prediction at a given station for the next day. Then, the reverse distance weighted interpolation method is utilized with elevation considered, a gridded hourly temperature forecast product in Chongqing with resolution $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ is finally obtained. Evaluation of the hourly temperature forecast products in 2018 shows that, the hourly temperature forecast accuracy with absolute error $\leq 2^{\circ}\text{C}$ for national meteorological observation stations is 79.73% ~ 91.40%, with average 87.12%; accuracy is better from October to February of the following year than that in March to September, while worse in August. The forecast performance of the model is stable with absence of rain, while slightly poor in the presence of precipitation in northeastern Chongqing where the topography is relatively complex. The gridded products are credible in most of Chongqing, expect for that in part of the mountainous regions in the southern and eastern area. In general, the method proposed in this study has a good and stable forecast performance.

Key words hourly surface temperature forecast; similar weather phenomena; complex terrain; interpolation