

文章编号: 2096-1618(2021)04-0413-12

基于 CFSv2 的四川省延伸期三类天气过程预报研究

董雪峰¹, 赖欣¹, 杨淑群², 王映思¹, 韩亚东¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室气候与环境变化联合实验室, 四川成都 610225; 2 四川省气象局气候中心 四川 成都 610072)

摘要:为建立四川省延伸期高温、降水和强降温过程的预报模型,利用第二代气候预报系统(climate forecast system version 2, CFSv2)预报的延伸期逐日环流场和四川省台站逐日降水、最高温度和最低温度,采用动力应用法,通过把预报环流场按预报时效逐日分组,以各组预报环流场与站点要素同期变化显著相关区域的环流场作为预报因子,逐日建立各站点的多因子线性预报方程。将站点预报插值为格点预报,得到四川省延伸期逐日降水、高温和强降温格点预报。3次预报试验和回报结果表明:该方法能够提前11~30天报出大型天气的主要发生时段、落区和强度。该方法对高温和强降温过程的预报效果比降水预报好,随着预报提前时间增加,3种要素预报效果逐渐降低。研究结果对延伸期精细化气象服务具有重要参考价值。

关键词:气象学;延伸期预报;四川;CFSv2;动力应用法

中图分类号:P456

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.011

0 引言

四川省位于中国西南腹地,西部为高原,东侧多为山地和丘陵,是中国地形最复杂的地区之一。四川是气象灾害的多发区和易发区^[1],近年来,高温干旱、暴雨和强降温等气象灾害多发,如2011年8月的持续高温热浪^[2],2009–2010年的特大干旱^[3],2018年6–7月出现了历史罕见的四川盆地持续暴雨天气并引发洪涝和泥石流^[4],2018年12月四川省出现了两次区域性强降温天气过程,第二次强降温过程给四川大部地区带来少有的降雪天气^[5]。灾害性天气及其次生灾害给当地造成了巨大的经济损失,并引起了社会的高度关注^[6–10]。中短期天气预报已不足以应对社会对气象预报的需求,结合应对自然灾害以防为主的方针^[11–12],四川省气象部门急需一种预报时效超过10天的精细化预报技术,以期有关部门决策提供科学依据,为防汛抗旱和防灾减灾工作提供更优质的气象服务。

延伸期预报是指10~30天的天气预报,预报时效处于中期天气预报和短期气候预测之间,是天气预报领域的一个重难点^[13],气象学家提出了多种方法进行延伸期预报。延伸期预报方法大致分为两类,第一是动力预报,如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国环境预报中心(NCEP)利用天气模式耦合海气、海冰和陆面模式的方法进行延伸期数值预报^[14]。第二是物理统计方法,这类方法思路灵活,在特定区域或

特定季节的延伸期预报中也取得了不错的预报效果^[15]。孙国武等^[16–18]利用带通滤波得到低频天气图,通过分析低频天气图上天气系统之间的配置关系来确定冷暖气流的汇合,预报降水过程,研究发现该方法对上海和江苏的延伸期强降水有较好的预报效果。唐红玉等^[19]对预报时间前期的NCEP的500 hPa高度场进行EOF分解,将EOF的主要模态进行恢复,用恢复场与历年同时段的恢复场对比分析,找出最相似年份,以历史相似年份中预报要素发生的概率进行重庆汛期的延伸期预报。基于物理统计方法的延伸期预报结果多是月、季尺度,无法实现精细化预报。现有的延伸期逐日动力预报产品对要素预报的准确率较低,而且四川的复杂地形也会对数值预报结果带来重要影响^[20–22],单独的动力或统计延伸期要素预报水平,与满足社会需求还存在一定距离。

丑纪范等^[23–24]在分析统计和动力方法在延伸期预报中表现后,阐述了动力和统计相结合进行延伸期预报的思想。以这种思想为基础发展起来的动力应用方法主要是以数值模式的环流预报为基础,利用统计方法,构建本地气象要素与环流场的关系,将环流预报转换成本地的要素预报。即是以动力预报结果为平台,利用统计方法合理的解释数值模式的环流产品^[25]。顾伟宗等^[26]基于国家气候中心海–气耦合模式预报的延伸期高空环流场与预报要素之间的变化关系,利用最优子集回归确定预报因子,建立中国夏季降水的预模型,结果表明,该模型对中国夏季降水趋势预测的准确率较高。动力应用法既充分利用动力预报对大尺度环流预报的高技巧,又兼顾统计方法简易灵活的优点^[27],在实际业务中是一种行之有效的延伸期预

收稿日期:2021-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42075081、41905008);四川省科技计划资助项目(2019YJ0359);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室资助项目(SCQXKJZD2019002);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室资助项目(2018-重点-07)

报方法^[28-31]。

采用动力应用法的思想,通过将 CFSv2 延伸期预报环流场按预报时效逐日分组,逐组挑选预报环流场与台站资料间显著相关区的环流场作为预报因子。确定预报因子后,各台站逐日建立延伸期预报模型,进行各站点延伸期逐日滚动预报。采用临近插值法将台站预报插值为格点预报,实现四川省夏季降水和高温与冬春季强降温的延伸期逐日格点预报。

1 数据与方法

1.1 数据

CFSv2 是美国环境预报中心 (NCEP) 第二代气候预报系统,由全球预报模式 (GFS)、地球物理流体动力学实验室 (GFDL) 开发的海洋模式、Noah 的 4 层土壤模型的陆面模式和 3 层的全球海冰模式耦合而成^[32]。CFSv2 从 2011 年 4 月 1 日开始提供每日 4 次 (世界时 00、06、12 和 18 时) 起报的预报时效为 9 个月的业务化预报产品^[33]。很多学者对 CFSv2 的预测能力做了多方面的研究,结果表明 CFSv2 对延伸期大尺度环流的预报技巧较高,对温度和降水等要素的预报技巧较差,预报技巧随预报时效增加而降低^[34-40],能够较为稳定的预测延伸期东亚高纬度阻塞高压的纬向变化特征^[41]。如图 1 所示,CFSv2 预报的环流场 (以下称环流场) 选取 2011-2018 年逐日 00:00 时起报的未来 11~30 天的 500 hPa 的纬向风 (u)、经向风 (v) 和位势高度场 (hgt),空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 6 小时。观测资料是四川省 156 个测站 (图 2) 2011-2018 年逐日的降水、最高温度和最低温度。

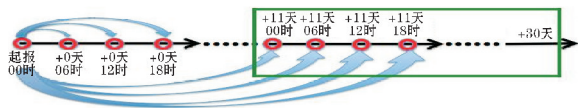


图1 CFSv2 模式预报输出间隔示意图 (矩形为选择的预报时效)

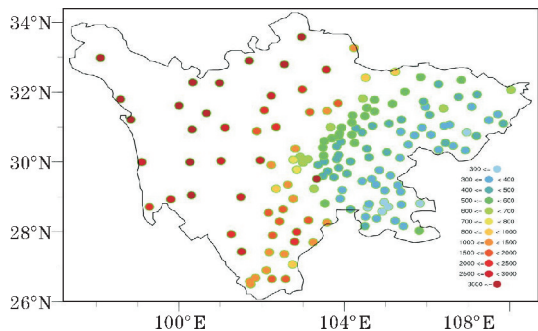


图2 四川省气象观测站点分布图

1.2 方法

四川省气象局在省防汛抗旱和防灾减灾工作中,需要提供夏季 (6-8 月) 未来 11~30 天的高温 (35°C

及以上)、降水 (10 mm 及以上) 与冬春季 (12-次年 4 月) 强降温天气 (24 小时变温 $\leq -4^\circ\text{C}$ 且日最低温度 $< 0^\circ\text{C}$) 过程的主要落区和强度的精准化逐日格点预报。

为实现以上预报目标,选用动力应用法进行预报。该方法以环流场 (u, v, hgt) 与站要素之间的关系为基础,以环流场中与台站要素变化显著相关的区域环流场为预报因子建立多因子预报方程,因此相关区选取对预报效果非常重要。对 CFSv2 环流场进行每日 4 次平均,挑选东亚地区 $-20^\circ\text{N} \sim 70^\circ\text{N}$ 、 $0^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$ 的环流场与各观测站的实测要素之间求同期相关,挑选最显著相关的区域环流场 (关键区) 为预报因子,建立预报方程,具体思路如下:

步骤 1 选择一种预报要素,如高温,确定一个站点和一种环流场,如 57416 站 (邻水) 和 hgt 。通过计算相关性来选取邻水站预报夏季延伸期高温过程的关键区时, hgt 起报时间的选取应保证每日起报的未来 11~30 天的预报都落入台站温度所选时间范围内,即邻水站最高温度序列是 2011-2018 年中每年的 6 月 1 日-8 月 31 日, hgt 的起报时间序列是 2011-2018 年 5 月 22 日-8 月 1 日 (5 月 22 日起报的未来第 11 天是 6 月 1 日, 8 月 1 日起报的未来第 30 天是 8 月 31 日, hgt 全部落入温度时间范围内)。同理计算降水与 hgt 相关时, hgt 和台站降水的时间序列与计算高温时所选时段相同。对于冬春季强降温过程 hgt 关键区的选取,邻水站最低温度的序列是 2011-2018 年中每年的 12 月 1 日-次年 4 月 30 日 (2018 年只包括 12 月), hgt 的起报时间是 2011-2018 年的 11 月 20 日-次年 3 月 31 日 (2018 年只包括 12 月)。

步骤 2 根据预报目标的要求,且 CFSv2 预报技巧与提前时间密切相关,因此对 hgt 和邻水站最高温度在步骤 1 中所选的时间序列按照预报时效进行逐日分组 (提前 11~30 天分 20 组)。挑选邻水站预报未来第 11 天高温的 hgt 关键区时, hgt 序列是 2011-2018 年中 5 月 22 日-8 月 1 日起报的未来第 11 天预报,最高温度序列是 2011-2018 年中每年的 6 月 1 日-8 月 12 日,对于第 12 天, hgt 序列是 2011-2018 年中 5 月 22 日-8 月 1 日起报的未来第 12 天预报,最高温度序列是 2011-2018 年中每年的 6 月 2 日-8 月 13 日。按照上述规律,选择未来 13~30 天预报的关键区时,预报提前时间每增加一天, hgt 序列的起报时间不变,预报时效增加一天,最高温度序列的时间整体后移一天。关键区的选择不使用常用的矩形区域,而是从相关场中选取相关系数最大且格点超过 16 个的多边形区域为关键区,以避免不是最显著格点对预报效果的影响 (图 3)。以关键区环流场平均值为预报因子。

步骤 3 每一个环流场 (hgt, u, v) 重复步骤 1、2,得到邻水站预报高温所需的 3 个预报因子,在延伸期内的每一天,邻水站都有 3 个预报因子来预报高温。

步骤 4 经过步骤 1~3 后,邻水站在延伸期内每一天有 3 个预报因子 (hgt, u, v) 与该站的最高温度对应,

把延伸期每天 3 个预报因子和高温序列代入式(1),计算得到 3 个预报因子对应的预报系数和回归误差,建立邻水站未来 11 ~ 30 天中每一天的 高温 预报 方程 (表 1),并对 预报 方程 的 预报 效果 进行 检验。采用 最小 二乘法 计算 预报 系数,预报 方程 的 效果 检验 采用 预报 和 实测 值 间 的 相关 系数 和 F 检验。从 表 1 可以 发现,邻 水 站 延伸 期 逐 日 高 温 预 报 方 程 都 具 有 一 定 的 预 报 能 力,预 报 时 效 越 长,预 报 和 实 测 值 的 相 关 系 数 越 小,说 明 方 程 的 预 报 效 果 随 着 提 前 时 间 增 加 是 降 低 的。

步骤 5 对四川省 156 个观测站,重复步骤 1 ~ 4,每一个站得到延伸期内每一天的 高温 预报 方程,每个台站有 20 个 预报 方程,分别 用于 计算 该 台 站 未 来 第 11 ~ 30 天 的 最 高 温 度。

步骤 6 对 3 种 预 报 要 素,重 复 步 骤 1 ~ 5,每 一 个 站 得 到 延 伸 期 内 每 一 天 的 3 种 要 素 的 预 报 方 程,分 别 用 于 计 算 该 台 站 未 来 第 11 ~ 30 天 的 高 温、降 水 和 强 降 温。

步骤 7 利用四川省 156 站延伸期每天的 预报 方程得到逐日的 站 点 要 素 预 报 值,采 用 临 近 插 值 法 将 站 点 预 报 插 值 成 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的 格 点 预 报,重 复 以 上 过 程,

得到夏季 高 温、降 水 和 冬 春 季 强 降 温 的 延 伸 期 逐 日 格 点 预 报,完 成 预 报 目 标。

$$y_{n+i} = hgt_n \times b_1 + u_n \times b_2 + v_n \times b_3 + a \tag{1}$$

$$r_{xf} = \frac{\sum_{i=1}^{t=m} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{t=m} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{t=m} (y_i - \bar{f})^2}} \tag{2}$$

$$rate = \frac{\sum_{for}}{\sum_{obs}} \tag{3}$$

$$F = \frac{U/p}{Q/(m-p-1)} \tag{4}$$

式(1)中, y 是 预 报 变 量, u 、 v 和 hgt 是 3 个 预 报 因 子, b_1 、 b_2 和 b_3 是 对 应 的 预 报 系 数, a 回 归 误 差, n 是 起 报 时 间, i 是 预 报 提 前 时 间 (11 ~ 30 天), $n+i$ 即 为 预 报 时 间。式(2)中, r 是 相 关 系 数, x 是 要 素 序 列, f 是 hgt 、 u 或 v 序 列,短 线 是 均 值, m 是 序 列 长 度。式(3)中, $rate$ 是 准 确 率, \sum_{for} 为 实 测 和 预 报 均 达 到 台 站 要 素 预 报 要 求 的 台 站 数 量, \sum_{obs} 是 实 测 达 标 的 台 站 数 量。式(4)中, F 为 检 验 统 计 量, U 为 回 归 平 方 和, Q 为 残 差 平 方 和, p 为 预 报 因 子 数 量, m 为 序 列 长 度。

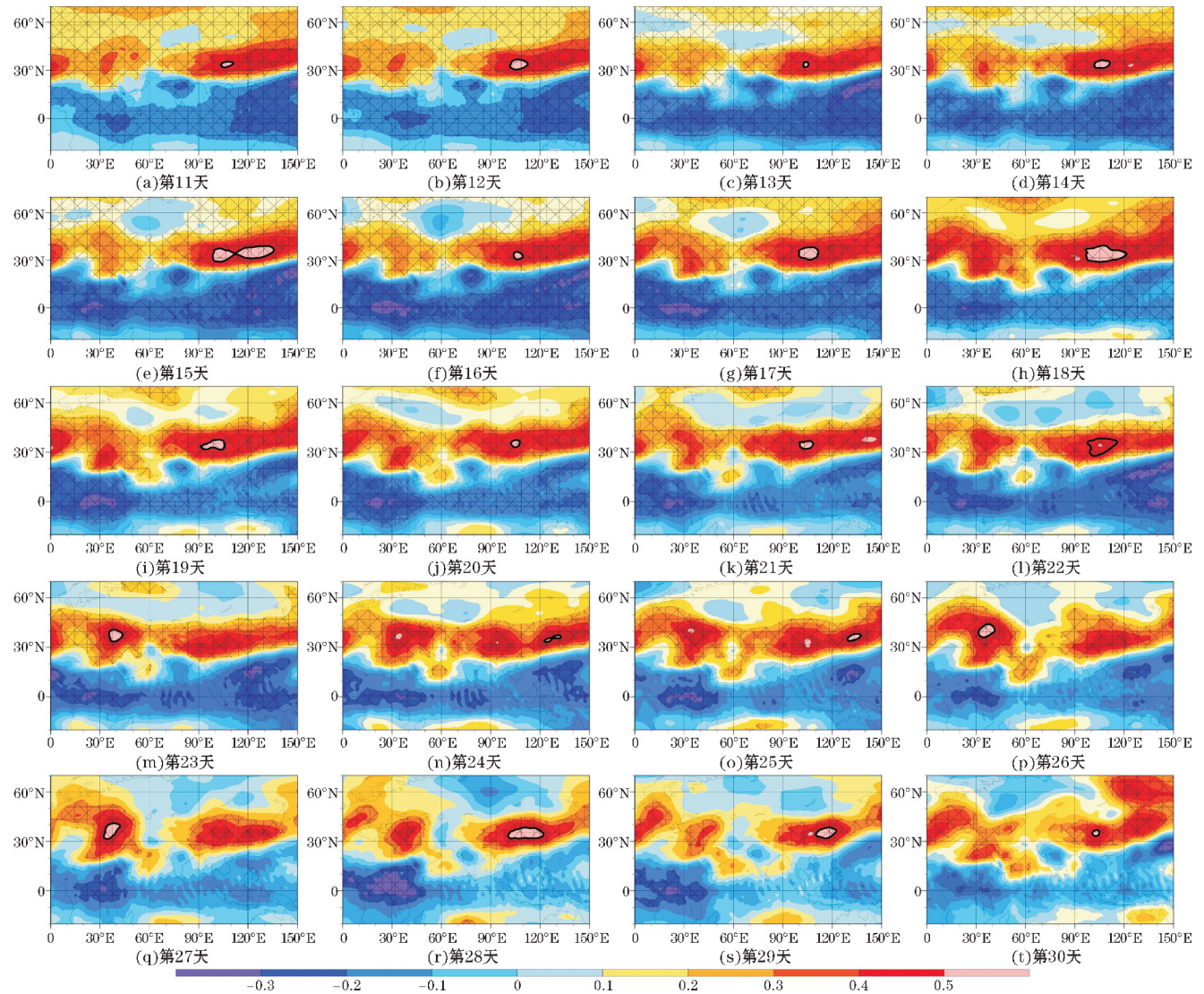


图 3 邻水站预报延伸期高温的逐日 hgt 关键区(粗黑线选中的多边形,网格是通过 95% 显著性检验的区域)

表1 邻水站高温预报方程统计表

提前时间	预报方程	相关系数
提前 11 天	$y = -561.117370605 + 0.1021964 \times hgt + 0.1463112 \times u - 0.0568632 \times v$ (*)	0.51
提前 12 天	$y = -568.573730469 + 0.1033885 \times hgt + 0.1318703 \times u - 0.0341734 \times v$ (*)	0.47
提前 13 天	$y = -484.232788086 + 0.0889233 \times hgt + 0.0257079 \times u - 0.0616368 \times v$ (*)	0.42
提前 14 天	$y = -405.382507324 + 0.0754474 \times hgt + 0.1271498 \times u + 0.1068175 \times v$ (*)	0.31
提前 15 天	$y = -452.822540283 + 0.0832285 \times hgt + 0.0811045 \times u + 0.1781222 \times v$ (*)	0.35
提前 16 天	$y = -392.165649414 + 0.0729926 \times hgt + 0.1306628 \times u + 0.2167951 \times v$ (*)	0.27
提前 17 天	$y = -423.843719482 + 0.0784294 \times hgt + 0.1127098 \times u + 0.2447852 \times v$ (*)	0.22
提前 18 天	$y = -412.388732910 + 0.0765257 \times hgt + 0.1636296 \times u + 0.1533817 \times v$ (*)	0.26
提前 19 天	$y = -324.044464111 + 0.0613674 \times hgt + 0.0526247 \times u + 0.1940197 \times v$ (*)	0.39
提前 20 天	$y = -387.367645264 + 0.0721531 \times hgt + 0.0639088 \times u + 0.1039301 \times v$ (*)	0.33
提前 21 天	$y = -394.738861084 + 0.0736593 \times hgt + 0.1290545 \times u + 0.1475265 \times v$ (*)	0.28
提前 22 天	$y = -243.301773071 + 0.0476264 \times hgt + 0.0339019 \times u + 0.1943784 \times v$ (*)	0.33
提前 23 天	$y = -142.239578247 + 0.0303573 \times hgt + 0.0450950 \times u + 0.2022774 \times v$ (*)	0.26
提前 24 天	$y = -130.268722534 + 0.0282413 \times hgt + 0.0609608 \times u + 0.1725442 \times v$ (*)	0.29
提前 25 天	$y = -142.728530884 + 0.0306085 \times hgt + 0.1152508 \times u + 0.1875171 \times v$ (*)	0.24
提前 26 天	$y = -152.992584229 + 0.0320998 \times hgt + 0.0448083 \times u + 0.0499730 \times v$ (*)	0.26
提前 27 天	$y = -228.061721802 + 0.0451431 \times hgt + 0.0450896 \times u + 0.2443773 \times v$ (*)	0.21
提前 28 天	$y = -156.613708496 + 0.0329139 \times hgt + 0.0260054 \times u + 0.1460677 \times v$ (*)	0.22
提前 29 天	$y = -186.686965942 + 0.0380955 \times hgt + 0.1703937 \times u + 0.1204649 \times v$ (*)	0.24
提前 30 天	$y = -127.165720523 + 0.0261965 \times hgt + 0.0563478 \times u + 0.0968782 \times v$ (*)	0.21

注: * 为预报方程通过 95% 显著性检验,相关系数越大,预报效果越好

2 动力应用法在四川省延伸期预报中的应用

按照上述方法建立了四川省夏季高温和降水与冬春季强降温天气过程的主要落区和强度延伸期预报模型,为说明该模型在四川省延伸期气象服务和防汛减灾工作中的可行性,现挑选3种典型的历史天气过程,同时将典型过程的预报结果和实测数据进行对比分析。

2.1 夏季降水过程延伸期预报

2018年7月27日-8月15日四川省中东部发生一次大范围降水过程,实测10 mm以上逐日降水变化(图4)显示这次降水过程主要分两个阶段(7月27-8月7日和8月8-15日)。第一阶段有3次主要降水(7月27-30日、7月30-8月1日和8月2-7日),3次降水的降水中心都是从四川东北部发生,之后向西向南移动,降水范围逐步扩大,最后移出四川。第1次和第3次降水南移路径都是中部路径,第2次则是沿着偏东路径,第1次和第3次降水范围大于第2次,3次

降水的最大降水量都超过40 mm。第二阶段的降水强度较第一阶段小,降水区较零散,也可分成3次降水(8月8-9日、10-12日和13-15日)。第1次和第2次降水类似,在四川东部发生后,快速南移,且降水范围小。第3次降水与前几次降水移动路径不同,向西移动到川西高原的东部。

图5是利用动力应用法2018年7月16日起报的2018年7月27日-8月15日四川省10 mm以上降水变化。预报显示对第一阶段降水的预报效果较好,特别是预报的第一阶段第3次降水的中心位置、落区分布和变化特征与实况基本一致。预报第1次和第2次降水的前期过程与实况有偏差,但是随着降水中向西向南发展,对第1次和第2次降水后期的降水中心位置和范围预报变好。预报第二阶段的降水落区分布和变化比第一阶段的效果差,特别是对第3次降水的预报,没有报出主要降水落区及其变化。预报显示的两个阶段的降水量级都小于实测降水量级,预报显示最大降水在20 mm左右,而实测最大降水超过40 mm。预报降水量与实测降水量存在偏差,可能是由于降水预报是以环流场中挑选的关键区环流数值为基础,通过

降水预报方程计算得出,关键区环流数值和预报值是线性关系,所以关键区环流数值有大幅度的变化时预报的降水量级也就大。CFSv2 是全球模式,受其分辨率影响,模式对小区域环流较大幅度的日变化特征的预报能力较低^[45],预报方程对降水量级的预报效果也较差。

这次降水主要发生在四川东部和南部,挑选四川东部和南部的 6 个站点(56186、56208、56381、56665、57206 和 57508 站)进行单站延伸期逐日预报。图 6 给出了 2018 年 7 月 16 日起报的这 6 个台站 7 月 27 日-8 月 15 日 10 mm 及以上降水的单站预报和实测降水量

的时间变化。结果显示,总体上延伸期降水预报抓住了单个台站主要降水发生的时间,特别是当台站出现连续性降水时,预报效果明显提高(图 6a、f)。对于连续性降水,其对应的天气系统的影响时间较长,数值模式更容易预报出这种环流形势^[46],关键区环流数值变化也可能更明显,方程的预报效果就会相应提高。提前 11~15 天的预报效果明显优于提前 16~30 天的预报效果,提前时间在 15 天后,空报和漏报现象明显增多(图 6b、d),6 个站点延伸期内的预报降水量级基本偏小。

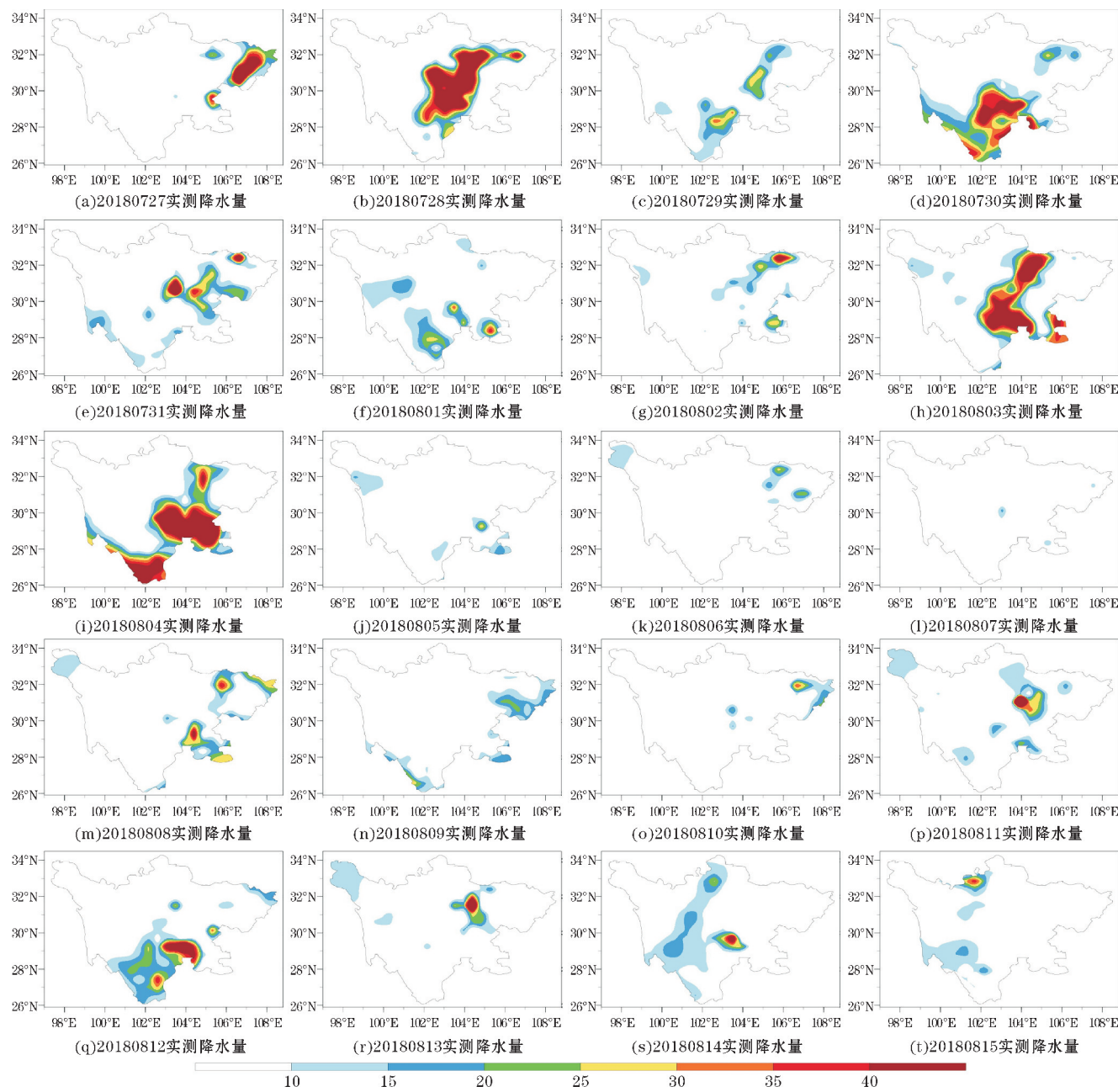


图4 四川省2018年7月27日-8月15日10 mm以上实测降水逐日分布

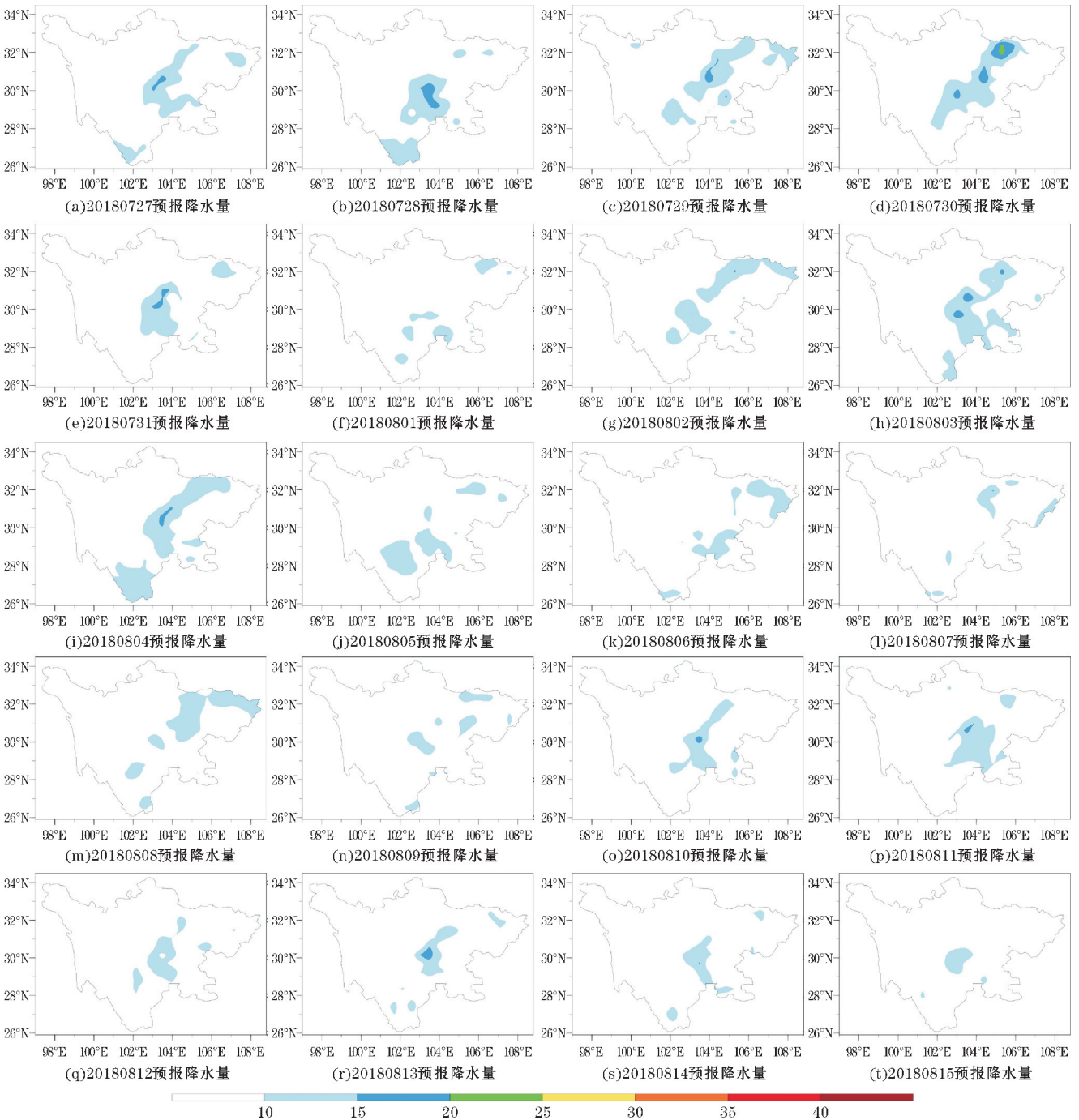


图5 四川省2018年7月16日起报的未来11~30天10 mm及以上降水预报图

2.2 夏季35℃以上高温天气延伸期预报

2018年7月15-24日四川东部出现了一次35℃以上高温天气(图7c、d、g、h、k、l、o、p、s、t),这次过程主要有两个发展阶段,第一阶段(15-20日),高温在四川东部两个地区出现,17日南北两个高温发生区域扩大,基本覆盖整个川东,持续到19日,20日高温区缩小成两个小区域。第二阶段(21-24日)和第一阶段类似,高温区域呈先扩大,后缩小的过程,但是高温的范围和强度都小于第一阶段。

预报这次高温过程,起报时间选择2018年7月4日,图7(a、b、e、f、i、j、m、n、q、r)给出了2018年7月4日起报未来11~20天(21~30天预报图略)的高温预报。结果显示第一阶段的预报除最初两天(图7a、b)高温范围和中心强度偏大外,其余时间高温发展的特征和实测基本一致。第二阶段高温的预报效果比第一阶段差,特别是对7月23日和24日的高温预报(图7q、r),预报的高温范围比实际要大很多,出现许多空报地区。

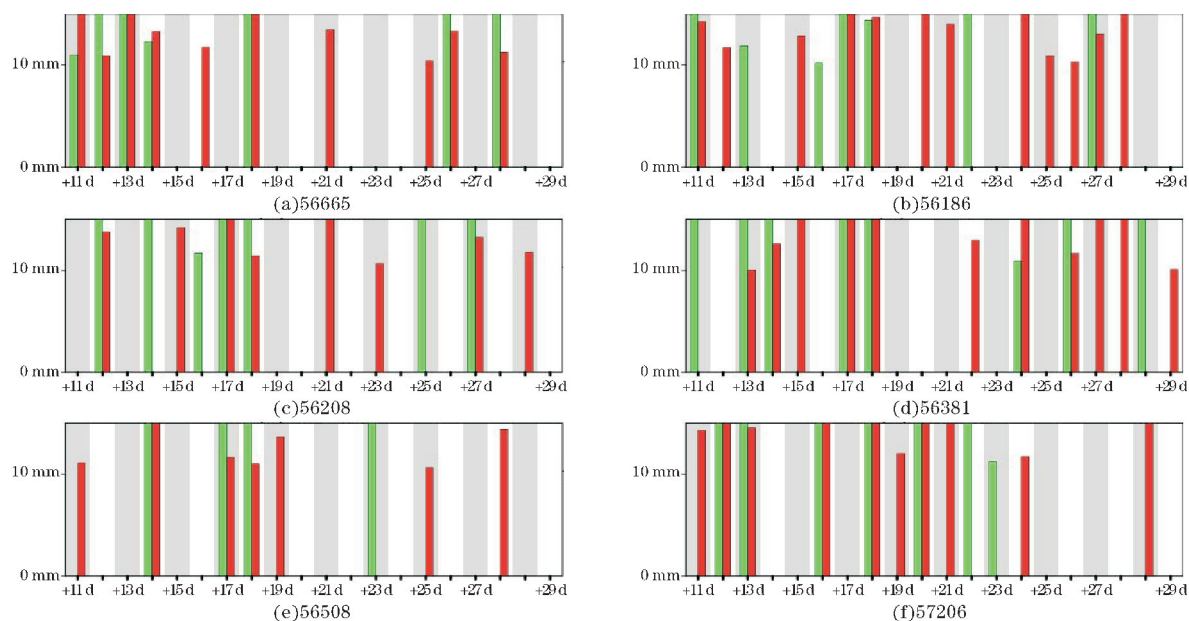


图 6 2018 年 7 月 16 日起报的四川省 6 个台站未来 11 ~ 30 天 10 mm 以上降水逐日变化(大于 15 mm 的数值不显示,绿色柱是实测值,红色柱是预报值,横轴是提前时间 11 ~ 30 天)

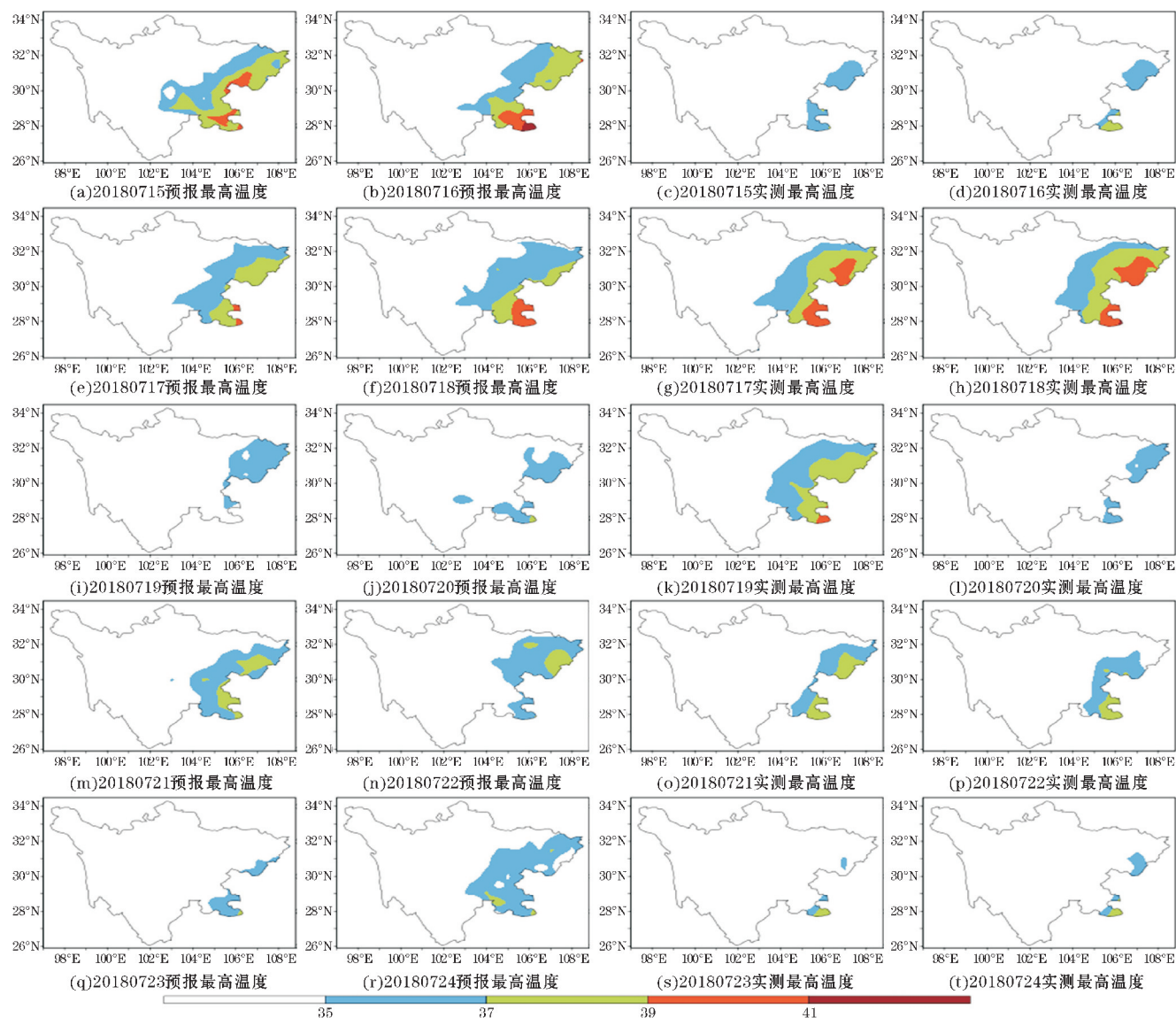


图 7 四川省 2018 年 7 月 4 日起报的未来 11 ~ 20 天 35 ℃ 及以上温度预报和实测 35 ℃ 及以上温度

为说明延伸期高温预报在单站预报中的效果,挑选这次高温主要发生区域的6个台站(56391、56399、57206、57320、57420和57603站)进行延伸期逐日高温预报(图8)。结果显示,各站的预报都能抓住高温发生的主要时段,当高温连续长时间出现时,预报对高温出现时段的预测效果更好(图8a、c、f)。提前20天以内的预报效果明显优于提前时间超过20天的预报效果,提前时间超过20天以后,空报(图8e、f)和漏报

现象(图8b、c)明显增多,6个站点延伸期内的温度预报和实测温度偏差较大。提前20天以后,高温预报效果变差的原因可能是因为预报高温的关键区是根据环流场和台站高温的相关性选取的,随着预报时效增加,CFSv2对环流预报的误差逐渐增大,关键区环流数值与台站高温间的相关性减小,导致高温预报方程的预报效果变差,空报和漏报站点增多。

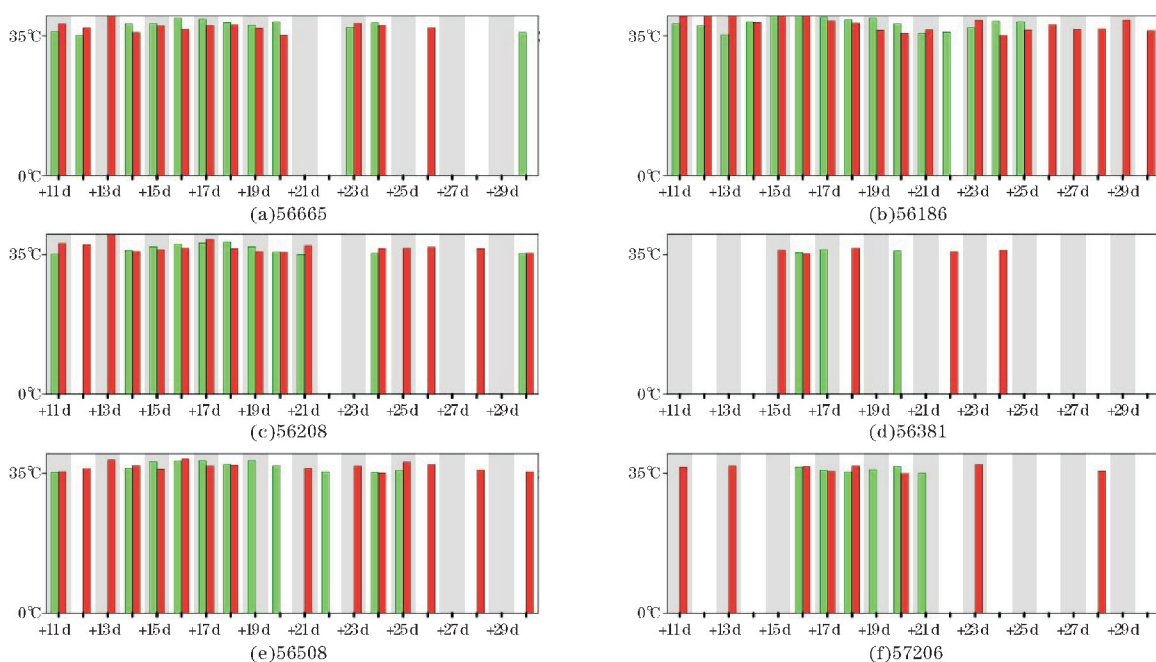


图8 2018年7月4日起报的四川省6个台站未来11~30天的35℃及以上温度逐日变化(大于40℃的数值不显示,绿色柱是实测值,红色柱是预报值,横轴是提前时间11~30天)

2.3 冬春季强降温过程延伸期预报

强降温过程是四川省冬春季节最易发生的气象灾害之一,严重影响着春耕播种的农业生产活动,特别是对春季发芽和幼苗期的农作物造成重大危害。2015年2月9日四川西部地区出现降温天气,部分站点达到强降温标准(图9a)。图9(b)~(k)给出了提前11~20天(21~30天预报图略)预报的2月9日降温过程,提前11天(图9b)的预报降温范围和实测基本一致,但没有报出强降温区域。提前12~13天(图9c~d)预报的强降温的范围和强度与实况一致,强降温预报效果好,但降温区范围偏大。提前14~16天(图9e~g)也预报出了强降温的落区和强度,但没有报出东南部的正变温区。提前17~19天(图9h~j)的降温预报基本维持了之前的预报特征,预报的强降温中心与观测值基本一致,但降温区较实测偏小,预报效果较提前14天前的差。提前20天(图9k)时,预报显示除四川西南是降温区与观测较符合以外,其余地区和观

测值偏差较大,预报效果也最差。

针对这次降温过程,挑选降温主要发生区域的四川西部的6个台站(56168、56263、56378、56459、56580和56670站),进行单站的延伸期逐日预报。图10是2015年1月22日起报的这6个台站未来11~30天的24小时变温逐日变化,结果显示,各台站都能预报出降温发生的主要时段,特别是对强降温发生时段预报效果更好。对强降温前后的小幅度降温也能做出较好的预报,但对不连续的小幅度降温预报效果较差(图10a、b、f)。这可能是因为相较于不连续的小幅度降温,强降温经常是中高纬阻塞形势在较长时间内发展崩溃后,冷空气向南爆发的结果,西风带槽脊维持时间较长,模式对这种持续时间较长的中高纬阻塞变化预报较好^[41],关键区环流数值变化可能更明显,方程的预报效果就较好。随着提前时间增加,各站的预报效果变差,空报和漏报现象增多,预报的降温强度与实际降温强度间的偏差增大。

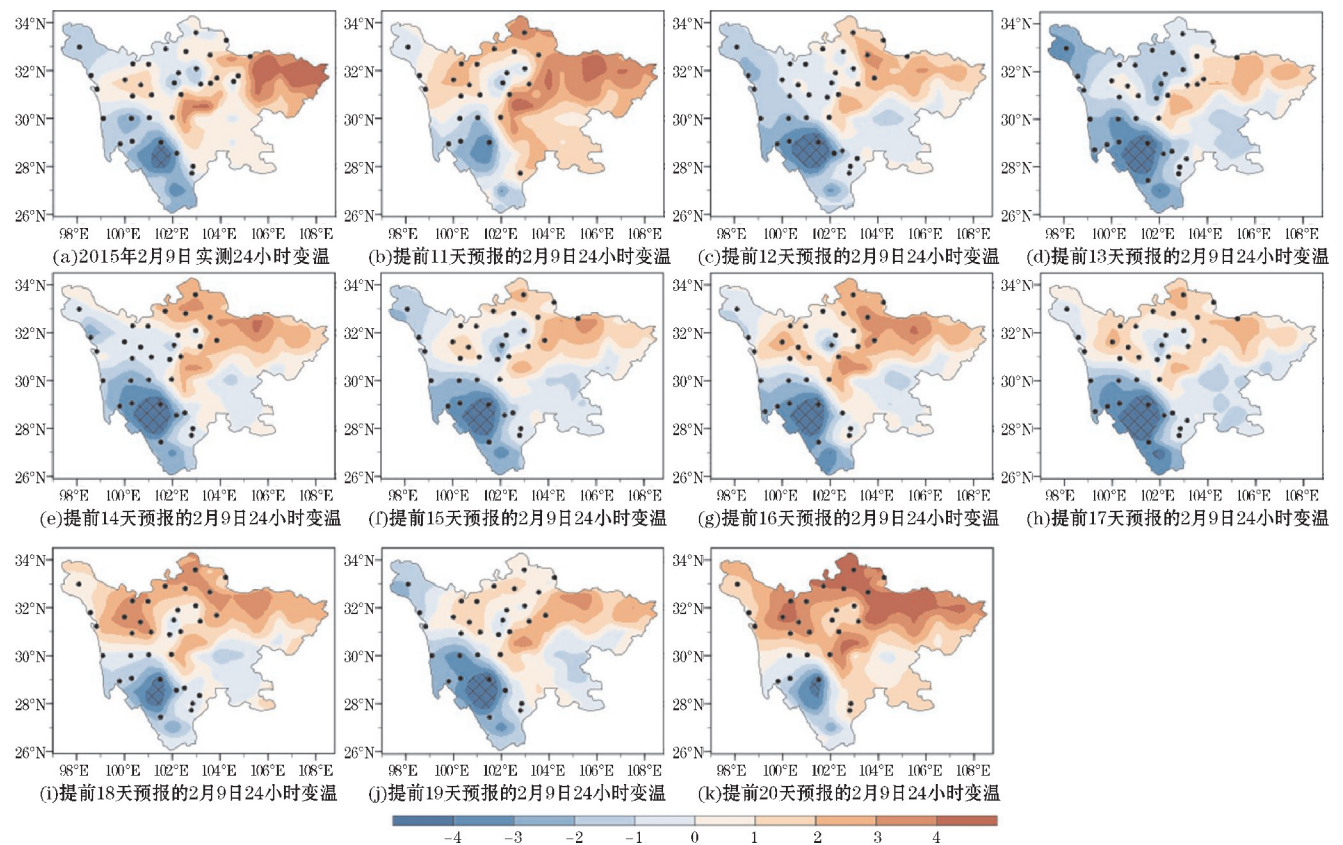


图9 实测、提前11~20天预报的2015年2月9日24小时变温分布图,降温大于4℃的区域(网格)和日最低气温小于0℃的站点分布(黑色标记)

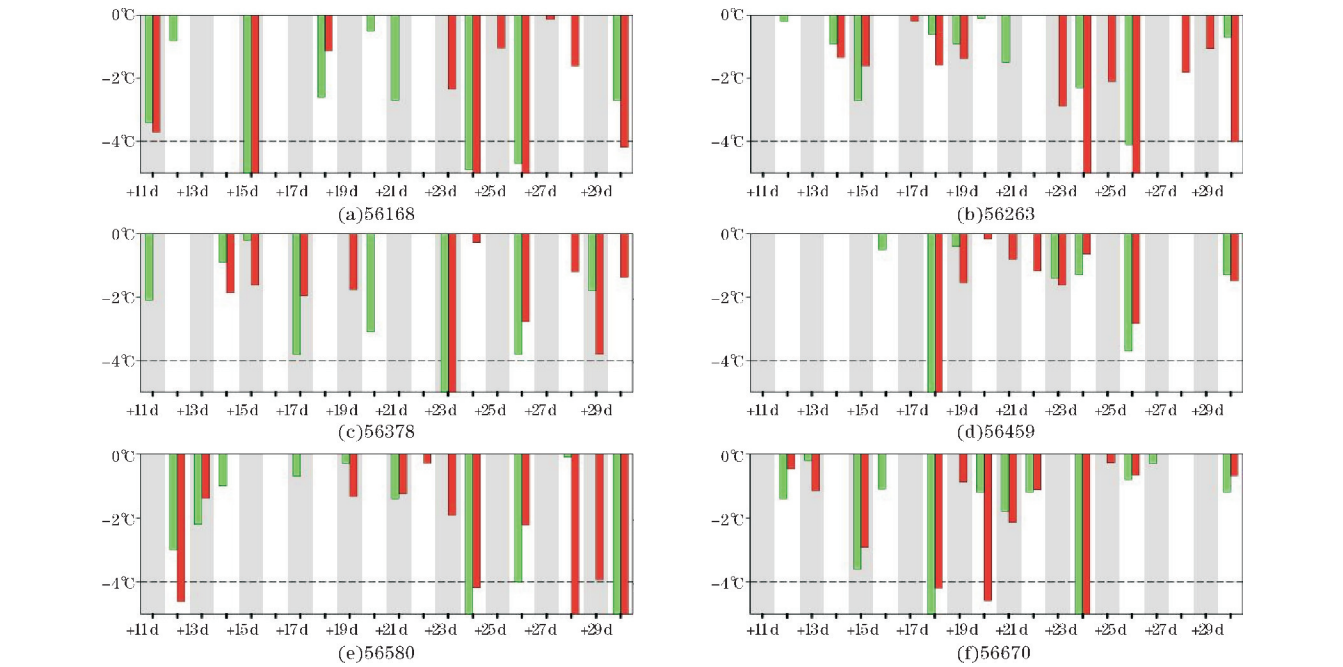


图10 2015年1月22日起报的四川省6个台站未来11~30天的24小时降温逐日变化(小于-6℃的数值不显示,绿色柱是实测值,红色柱是预报值,横轴是提前时间11~30天)

2.4 动力应用法回报结果

表2 是利用给出的方法建立的延伸期逐日预报模型对3种要素回报的准确率,预报准确率的计算方法

参考式(3)。总体来看,对高温天气预报的准确率高于强降温天气,对10 mm以上降水的预报准确率最低。从逐日预报来看,随着预报提前时间增加,3种要素的预报准确率呈振荡降低趋势,准确率降低最明显的是

对10 mm以上降水过程的预报,准确率最稳定的是强降温预报。

高温预报的准确率高於降水和强降温,特别是在第 20 天以后,高温预报的准确率还在较高水平,这可能是由于四川高温多受低纬度的西太平洋副热带高压和南亚高压的影响^[2],数值模式在第 3 周后的有技巧预报主要在热带地区,部分高层变量如位势高度场^[47],以及个别气候因子^[48]。强降温预报准确率更稳定的原因,可能是因为强降温多是冷空气在高纬度堆积,阻塞高压崩溃后,西风槽加深引导冷空气南下的结果^[5],CFSv2 能够稳定的预测中高纬度阻塞形势的变化^[41]。影响四川发生短时强降水的天气系统,如西南涡,高原槽和低空切变线等,其移动速度快,生命周期较短^[42-43],受模式分辨率限制,CFSv2 对这类中小尺度天气系统的预报能力差,降水预报关键区环流的数值变化不明显,导致降水预报的准确率较低。

表 2 动力应用法回报的 3 种天气过程的准确率

预报准确率	强降温预报	10 mm 降水预报	高温预报
提前 11 天	0.505535	0.359662	0.721469
提前 12 天	0.505510	0.415359	0.749294
提前 13 天	0.513988	0.406136	0.683997
提前 14 天	0.497652	0.29857	0.689645
提前 15 天	0.494424	0.305134	0.738839
提前 16 天	0.486945	0.321425	0.656366
提前 17 天	0.489488	0.236191	0.690944
提前 18 天	0.495555	0.266861	0.691958
提前 19 天	0.492226	0.224849	0.642274
提前 20 天	0.480543	0.289602	0.641576
提前 21 天	0.460352	0.31399	0.714910
提前 22 天	0.501075	0.263328	0.698070
提前 23 天	0.490901	0.258609	0.679151
提前 24 天	0.49250	0.258752	0.673781
提前 25 天	0.463372	0.325186	0.726095
提前 26 天	0.496633	0.343893	0.708690
提前 27 天	0.456266	0.298517	0.741395
提前 28 天	0.484914	0.318589	0.676558
提前 29 天	0.471460	0.292697	0.651170
提前 30 天	0.484541	0.259361	0.618586

3 结论与讨论

采用动力应用法,以 CFSv2 的 3 种预报环流场与站点要素变化显著相关的区域环流场为 3 个预报因子,逐日建立夏季10 mm及以上降水、35 ℃及以上高温和冬春季强降温天气延伸期的多因子预报模型,实现了四川省延伸期逐日滚动格点预报,结论如下:

(1)在降水、高温和强降温天气过程的延伸期预报试验中发现,除预报的降水强度偏小外,动力应用法对降水落区、高温和强降温天气的落区和强度有较好的预报效果。但是随着提前时间增加,预报效果逐渐下降。

(2)2011-2018 年的延伸期回报结果表明,动力应用法具有一定的业务应用价值,对高温延伸期预报的准确率高于强降温和降水过程。随着提前时间增加,3 种要素的预报准确率总体呈降低趋势,准确率降低最明显的是降水预报,预报准确率最稳定的是强降温预报。

在四川省延伸期预报中仅用了一种模式的 3 种环流产品作为预报因子,实际业务应用中,可以按照集合预报的思想,采用多种模式的多种环流场产品,或把前期的气候因子(海温和土壤湿度等)加入预报模型来建立集合预报方程。同时,随着四川省地面气象观测体系建设的逐渐完善,可用的地面观测站(包括乡镇级别的区域观测站)越来越多^[44],将资料长度满足条件的站点也加入预报模型,可能会取得更好的预报效果,这将在今后的工作中进一步研究。

致谢:感谢成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金项目(J201711)对本文的资助

参考文献:

[1] 黄小梅,赵旋,肖丁木. 1961 ~ 2016 年四川盆地夏季高温热浪变化特征分析[J]. 高原山地气象研究,2019,39(2):14 - 22.

[2] 彭京备,陈烈庭. 青藏高原移动性高压对夏季川东地区高温天气的影响[J]. 气候与环境研究, 2011,16(5):665-678.

[3] 韩兰英,张强,姚玉璧,等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报,2014,69(5):632-639.

[4] 陈永仁,于浩慧,魏挪巍,等. 应用主成分构建的暴雨致灾能力评估指数及其应用[J]. 高原山地气象研究,2019,39(3):20-26.

[5] 肖红茹,伍清,蒋兴文,等. 四川盆地两次冬季寒潮天气过程对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2019,39(4):46-52.

[6] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学,2012,36(3):443-457.

[7] 周长春,汪丽,郭善云,等. 四川盆地高温热浪时空特征及预报模型研究[J]. 高原山气象研究, 2014,34(3):51-57.

- [8] 李忆平,王劲松,李耀辉. 2009/2010年中国西南区域性大旱的特征分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(4): 537-545.
- [9] 蔡元刚,吴婷婷,张文千,等. 基于REOF的四川省高温热浪时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 201-208.
- [10] 张顺谦,王春学,陈文秀,等. 四川省暴雨过程强度及损失评估方法研究[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(1): 79-85.
- [11] 马建华. 西南地区近年特大干旱灾害的启示与对策[J]. 人民长江, 2010, 41(24): 7-12.
- [12] 焦贺言,程永. 推进新时代自然灾害防治改革与发展的思考——浅析习近平防灾减灾救灾思想的科学内涵与时代价值[J]. 中国应急救援, 2019(2): 10-14.
- [13] 金荣花,马杰,任宏昌,等. 我国10~30天延伸期预报技术进展与发展对策[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 814-825.
- [14] 章大全,郑志海,陈丽娟,等. 10~30 d延伸期可预报性与预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 416-430.
- [15] 朱玉祥,俞小鼎,赵亮,等. 10~30 d延伸期预报及其策略思考[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 38-44.
- [16] 孙国武,信飞,孔春燕,等. 大气低频振荡与延伸期预报[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1142-1147.
- [17] 蒋薇,孙国武,陈伯民,等. 江苏省汛期强降水过程的延伸期预报试验. 气象科学, 2011, 31(增刊): 24-30.
- [18] 陈申鹏,孙国武,曾鼎文. 大气低频系统与华南强降水过程的研究[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 480-490.
- [19] 唐红玉,李永华,何慧根,等. 前期环流相似法在重庆延伸期天气过程预报中的应用[J]. 气象科技, 2017, 45(1): 71-77.
- [20] 宇如聪,曾庆存,彭贵康,等. “雅安天漏”研究II. 数值预报试验[J]. 大气科学, 1994, (5): 535-551.
- [21] 何钰,李国平. 青藏高原大地形对华南持续性暴雨影响的数值试验[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 933-944.
- [22] 张宇,陈德辉,仲跻芹. 数值预报在青藏高原的不确定性对其下游预报的影响[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1430-1440.
- [23] 丑纪范. 为什么要动力-统计相结合?——兼论如何结合[J]. 高原气象, 1986(4): 367-372.
- [24] 任宏利,丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 988-993.
- [25] 杨秋明. 10~30 d延伸期天气预报方法研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 970-984.
- [26] 顾伟宗,陈丽娟,李维京,等. 降尺度方法在中国不同区域夏季降水预测中的应用[J]. 气象学报, 2012, 70(2): 202-212.
- [27] 丁婷,陈丽娟. 东北地区夏季旱涝的环流型及动力气候模式解释应用[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1119-1130.
- [28] 孙国武,李震坤,信飞,等. 延伸期天气过程预报的一种新方法——低频天气图[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 945-954.
- [29] 李维京,陈丽娟. 动力延伸预报产品试用方法的研究[J]. 气象学报, 1999, 57(3): 338-345.
- [30] 舒建川,蒋兴文,黄小梅,等. 中国西南夏季降水预测的统计降尺度建模分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 349-358.
- [31] 尹姗,李勇,马杰,等. 延伸期温度预报误差订正技术初探[J]. 气象, 2020, 46(3): 412-419.
- [32] Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. The NCEP Climate Forecast System version 2[J]. J Climate, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [33] 董少柔,杨崧,张团团,等. Dynamical Prediction West China Autumn Rainfall by the NCEP Climate Forecast System[J]. J Trop Meteor, 2019, 25(1): 114-128.
- [34] Liu R F, Wang W. Multi-week prediction of South-East Asia rainfall variability during boreal summer in CFSv2[J]. Climate Dyn, 2015, 45(1-2): 493-509.
- [35] Li C Z, Yang S, Li C H, et al. Seasonal Predictions for Spring and Autumn Surface Air Temperatures Over Southern China by the NCEP CFSv2[J]. J Trop Meteor, 2019, 25(4): 448-461.
- [36] 黄小梅,蒋兴文,肖丁木. NCEP CFSv2对中国2015年夏季月尺度降水和环流预报分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 48-58.
- [37] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655.
- [38] Jie S Z, Arun Kumar. Role of Sea Surface Salinity Feedback in MJO Predictability: A Study with CFSv2[J]. J Climate, 2019, 32(18): 5745-5759.

- [39] Omid A C, Morteza Q, Sajede M. Evaluation of 2m temperature and precipitation products of the Climate Forecast System version 2 over Iran[J]. *Dyn Atmos Oceans*, 2019, 88:101–105.
- [40] Wei Xiao wen, Liang Ping, Wu Hui. Low-frequency Circulation and Extended-range Forecast in Connection with Autumn Extreme Heavy Rain-fall Process in Hainan[J]. *J Trop Meteor*, 2019, 25(4):542–552.
- [41] 周宁芳, 贾小龙. NCEP CFSv2 对北半球夏季中高纬阻塞高压的预测检验[J]. *高原气象*, 2018, 37(2):469–480.
- [42] 沈沛丰, 张耀存. 四川盆地夏季降水日变化的数值模拟[J]. *高原气象*, 2011, 30(4):860–868.
- [43] 宗志平, 陈涛, 徐珺, 等. 2012 年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验[J]. *气象*, 2013, 39(5):567–576.
- [44] 李集明. 基于 Internet 面向社会公益性共享的气象科学数据存储检索策略研究[J]. *气象科技*, 2007(4):589–592.
- [45] 王东海, 赵艳凤, 翟盘茂. 持续性强降水的区域模式动力中期预报研究[J]. *气象学报*, 2019, 77(1):1–14.
- [46] 黄刚, 张立凤, 王秋良, 等. 基于集合预报产品的降尺度降水预报试验[J]. *气象科学*, 2012, 32(5):508–514.
- [47] Pegion K, Sardeshmukh P D. Prospects for improving subseasonal predictions[J]. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(11):3648–3666.
- [48] Wang Wanqiu, Huang Mengpai, Weaver S J, et al. MJO prediction in the NCEP Climate Forecast System version 2[J]. *Climate Dyn*, 2014, 42(9–10):2509–2520.

Forecast Research on Extended Range Weather of Three Kinds of Weather Process for Sichuan Province based on CFSv2

DONG Xuefeng¹, LAI Xin¹, YANG Shuqun², WANG Yingsi¹, HAN Yadong¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2. Climate Center of Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu, 610072, China)

Abstract: In order to establish the forecast model of the extended range process of high temperature, precipitation and strong cooling of Sichuan Province, the daily atmospheric circulation forecast data of the second climate forecast system version 2 (CFSv2) during extended range and observation data of stations in Sichuan Province are selected. Using interpretation of numerical models products, a daily forecast model of the precipitation, high temperature in summer and strong cooling in winter during the extended range is established. By Grouping the atmospheric circulation forecast data of CFSv2 by daily according to the lead time, and selecting circulation forecast data of the region where atmosphere circulation forecast data and site data are significantly related at the same time of each group as forecast factors, daily multi-factor linear forecast equations for each station are established. Then the site forecasts are interpolated into grid forecasts of daily high temperature, precipitation and strong cooling of extended range. The three forecast experiments and the results of reforecast show that, this method can capture the main period, falling area and intensity of large weather 11–30 days in advance. The forecast effect of this method on the process of high temperature and strong cooling is better than that of precipitation. With the leading time increases, the forecast effect decreases. The results of this study have important reference value for fine meteorological service in extended period.

Keywords: meteorology; extended range forecast; Sichuan province; CFSv2; interpretation of models products