

张利红,李跃清,秦宁生,等. 青藏高原坡面观测信息对我国夏季降水预报作用[J]. 气象,2011,37(10):1233-1240.

青藏高原坡面观测信息对我国夏季降水预报的作用^{*}

张利红¹ 李跃清¹ 秦宁生² 徐祥德³

1 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072

2 四川省气象局农业气象中心,成都 610072

3 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要: 利用不同同化方式分别同化青藏高原地区新一代综合气象观测网的自动站和 GPS 大气可降水量信息,探讨这些观测资料对我国夏季不同区域降水预报的作用。通过两组数值试验对 2008 年夏季连续两个月的天气进行分析场和降水预报结果检验,得出以下主要结论:(1)由于同化测站的平均台站高度在 2550 m 以上,因此同化青藏高原地区新一代综合气象观测网资料后,对背景场调整的正作用主要集中在 500 hPa 以上;循环同化方式对背景场的调整作用比静态同化方式更明显,尤其在 500 hPa 以上;(2)无论用静态同化,还是循环同化,该观测网资料对华北地区降水预报的改善作用都不太明显,只是对个别降水量级有改善作用;(3)采用静态同化,会对西南地区东部 24 小时降水预报有改善作用;在多数情况下同化沿 99°E 附近的 7 个测站资料得到的降水预报结果比同化 24 个站的好;(4)对于长江中下游地区,采用循环同化方式更有利于该地区降水预报准确率的提高,尤其是对 25~48 小时降水的预报;同时,在多数情况下同化 24 个自动站和 GPS 大气可降水量信息对降水预报改善比只同化 7 个站的更好。

关键词: 新一代气象综合观测网,资料同化,降水预报,青藏高原

The Role of Observations from Tibetan Plateau Slope in Summer Rainfall NWP in China

ZHANG Lihong¹ LI Yueqing¹ QIN Ningsheng² XU Xiangde³

1 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

2 Sichuan Agricultural Meteorological Centre, Chengdu 610072

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Using different assimilation methods, data from automatic stations and precipitable water vapor (PWV) data from GPS stations in the Tibetan Plateau and its vicinity are assimilated, in order to investigate the role played by these observations in summer rainfall prediction in China. Through comparing assimilation results and precipitation forecast results of two months in summer of 2008, the main conclusions can be drawn from this paper as follows: Firstly, as the average height of these observational stations is above 2550 m, the positive effects to adjust the background fields are concentrated on the pressure above 500 hPa after assimilating the observations in the Tibetan Plateau and its vicinity; The adjustment using intermittent assimilation is more obvious than using single assimilation, especially above 500 hPa. Secondly, regardless of intermittent assimilation or single assimilation, the improvements of precipitation forecast in North China are less obvious, except for individual precipitation levels. Thirdly, using single assimilation can improve obviously the rainfall forecast in eastern Southwest China; In most cases, precipitation forecast results obtained by assimilating the 7 stations' observations along 99° E are more accurate than by

* 中日政府间 JICA 渠道技术合作项目“中日气象灾害合作研究中心”、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室自主研究项目(2008LASWZ104)和中国气象局成都高原所基本科研业务费专项(BROP201031)共同资助

2010 年 9 月 18 日收稿; 2011 年 3 月 31 日收修定稿

第一作者: 张利红,主要从事资料同化和数值天气预报研究工作. Email: zhanglh_2008@163.com

assimilating the 24 stations' observations. Fourthly, using intermittent assimilation is more conducive to the precipitation forecast in the Yangtze River areas, especially for the 25—48 h precipitation forecast; At the same time, the precipitation forecast by assimilating 24 stations' observations is superior to the one by assimilating 7 stations' mostly.

Key words: new generation of integrated meteorological observation network, data assimilation, precipitation forecast, Tibetan Plateau

引 言

青藏高原是世界上最高的高原,平均海拔在 4500 m 以上,约达对流层高度的 1/3,总面积达 250 万 km^2 ^[1],占我国国土面积的 1/4。由于青藏高原独特的地形特征,使其对下游天气和气候有十分重要的影响。国内外很多学者就青藏高原对我国降水的影响开展了一系列研究,并取得了丰硕成果^[2-9],徐祥德等^[10]研究指出从孟加拉湾经青藏高原东部转向中国长江流域和日本列岛的水汽是影响中国区域及其下游相关区域洪涝偏南水汽输送的关键区。

考虑到高原及其东部周边地区作为长江中下游地区“天气系统上游强信号区”的特殊地位,中国气象科学研究院承担的 JICA 项目在青藏高原及其东部周边地区建立了新一代气象综合观测网,填补了高原及周边地区综合观测数据的空白^[11]。该观测网的建立无疑为高原及其下游高影响天气预报研究创造了很好的条件。彭世球等^[12]利用多时间层的三维变分同化技术,同化青藏高原地区新一代综合气象观测网中 24 个自动气象站资料,对 2008 年 1 月发生在我国南方及长江中下游的一次雪灾过程进行数值模拟,发现同化后对于预报下游区域的降水预报至关重要;施晓辉等^[13]利用该气象观测网中的 GPS 大气可降水量资料、NCEP 再分析资料和中国台站降水量资料分析我国 2008 年中国南方的 4 次暴雪过程,发现水汽输送上游关键区大气可降水量的变化可作为此次南方雨雪冰冻灾害期间降水发生的“前兆性”信号。他们利用新一代综合气象观测网资料分别从定量、定性两个角度,说明其对我国下游高影响天气预报的重要性,但研究对象都是 2008 年发生在我国南方的冬季降雪过程,那么对于我国夏季降水预报而言,这些观测资料是否有用呢?采用何种同化方式得到的降水预报效果会更好?同化上游观测资料,会对哪些区域降水改进作用明显?基于这些问题,本文利用青藏高原地区新一代综合气

象观测网的 24 个自动站和 GPS 水汽资料,针对我国 2008 年 6—7 月的降水预报开展数值试验,为已经投入业务应用的该观测网资料在数值预报中得到更好应用提供一个参考。

1 资料和模式介绍

文中使用的背景场资料由我国 T213 模式的 12 小时预报场提供,资料水平分辨率 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$,垂直分辨率 17 层。观测资料来自青藏高原地区新一代综合气象观测网中 24 个自动站资料和 GPS 水汽资料,主要同化自动站资料的地面气温、相对湿度、气压和 GPS 资料的大气可降水量信息,观测站点随地形高度的分布如图 1 所示,图中 7 个实心圆位于 99°E 附近,是高原东南缘坡面上不同高度的 7 个观测站,它们与不同高层无线电探空探测获取的大气廓线信息存在某种程度的关联性,其在观测时间频数、“定点”、“定高”及其同步性等方面均具有优势^[12]。

文中使用的同化和预报系统均来自新一代细网格中尺度模式系统——WRF 三维变分同化系统及其模式。对于三维变分同化系统,误差协方差用来衡量背景场和观测场中各因子的相互影响,包括观测误差协方差和背景误差协方差,其中背景误差协方差最为重要。龚建东等^[14]、范水勇等^[15]研究发现应根据实际研究建立新的背景误差协方差,这有助于改善预报效果,因此,本文用 T213 预报场资料为 WRF 模式提供初值和边界,根据 2008 年 7 月模式的预报结果,采用 NMC^[15-16]方法,重新计算了 WRF 3DVAR 的背景误差协方差。

2 试验方案和检验方法

试验分为两组,第 1 组试验采用静态同化,分别同化 7 个自动站资料、24 个自动站资料、7 个自动站和该站的 GPS 水汽资料、24 个自动站和该站的

GPS 水汽资料,在下文中分别用 A1、B1、C1 和 D1 表示。第 2 组试验使用与第 1 组相同的观测资料,但采用循环同化,同化窗口为 6 h,每小时同化一次,分别用 A2、B2、C2 和 D2 表示。这些资料已经过一定质量控制,同时在同化模块还会把观测资料与背景场进行比较,超出设定阈值,将被剔除,保证了进入同化系统观测资料质量。为了便于比较,增加一个控制试验(用 CT 表示),同化试验与控制试验采用相同的模式分辨率、物理过程选项和时间参数设置。

模式的水平分辨率 50 km,格点数 100×70,垂直分辨率 28 层,积分区域中心为(28°N、103°E),区域大小在图 1 中用扇形阴影表示;模式微物理过程用 WSM 3 阶简单冰方案;积云参数化过程用 Grell 方案;边界层过程用 YSU 方案;长波辐射过程用 RRTM 方案;短波辐射过程用 Dudhia 方案。模式起报时间是每日 00 时(世界时,下同),进行 48 小时预报,试验时间为 2008 年 6 月 1 日至 2008 年 7 月 31 日。

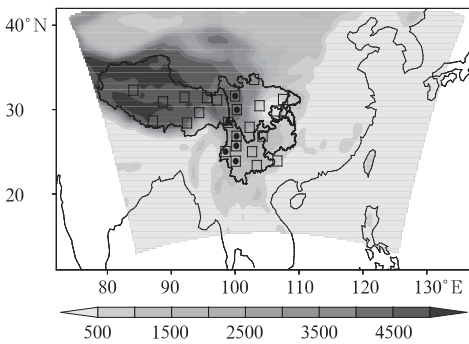


图 1 试验区域和同化站点随高度的分布
□表示 24 个站点,●表示 7 个站点,
灰色阴影表示地形高度(单位:m)
Fig. 1 Test regions and the distribution of
assimilation stations with height
□ indicates 24 stations, ● indicates 7 stations,
gray shading: terrain height (unit: m)

对于近两个月的预报试验,首先利用探空观测资料对同化结果进行分析场要素的均方根误差分析,统计区域为:20~40°N、93~123°E;其次利用降水实况分别对 24 和 48 小时降水预报结果进行预报准确率 TS 评分、预报漏报率、预报空报率和预报偏差分析,检验中采用双线性插值方法把模式降水预报的格点场资料插到站点上进行检验评分^[17],参与评分的四个雨强依次为 10、25、50 和 100 mm。对

分析场和降水检验的公式如下:

预报准确率

$$TS = N_z / (N_z + N_k + N_l) \quad (1)$$

预报漏报率

$$PO = N_l / (N_z + N_l) \quad (2)$$

预报空报率

$$NH = N_k / (N_z + N_k) \quad (3)$$

预报偏差

$$BS = (N_z + N_k) / (N_z + N_l) \quad (4)$$

平均误差

$$E_n = \frac{1}{n} \sum (F - A) \quad (5)$$

均方根误差

$$E_{RMS} = \left[\frac{1}{n} \sum (F - A)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中, N_z 表示对某一降水量级,预报降水与实况降水一致的总站数; N_k 表示对某一降水量级,预报报出而实况没出现的总站数; N_l 表示对某一降水量级,预报没报出而实况降水达到该量级的总站数。 TS 评分通常是用来衡量降水预报对观测的降水能够有多么准确的指数, TS 评分等于 1,说明预报降水与实况降水完全一致。 \sum 表示对区域内所有点求和, F 为模式预报值, A 为实况观测值。

由于同化站点都分布在青藏高原及其周边地区,为了了解同化这些站点资料后会对下游的哪些区域降水预报有影响,以及有怎样的影响,特划分了三个区域分别检验:华北地区 35~40°N、100~123°E、西南地区东部 20~35°N、100~110°E、长江中下游地区 20~35°N、110~123°E,图 2 给出了三个区域及区域内降水观测站点分布。

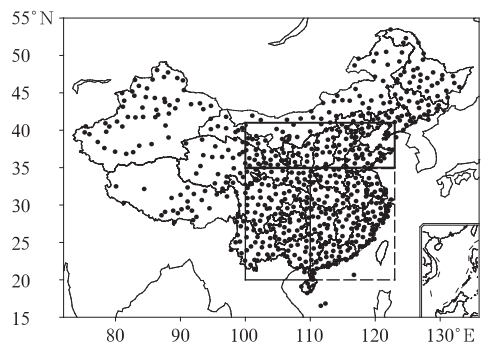


图 2 三个检验区域内降水观测站点分布
Fig. 2 Distribution of precipitation
observation stations in three test regions

3 试验结果

3.1 分析场误差分析

图 3 给出第一组试验分析场与探空资料在 7 个标准等压面层的位势高度、温度、相对湿度均方根误差变化。由图看出,同化方案三个要素的均方根误差变化趋势与控制试验的相似,具体来看:从 700~400 hPa,同化方案的位势高度均方根误差均小于控制试验,其余层次 B1 与 D1 方案都大于控制试验, A1 与 C1 只在 850 和 250 hPa 略大于控制试验;在 400 hPa 及以上,方案 A1~D1 的温度场均方根误差

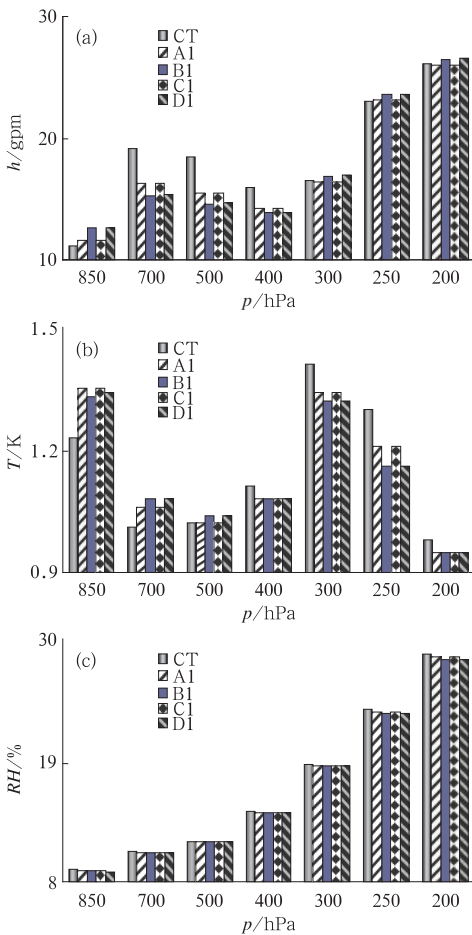


图 3 第一组试验分析场与探空观测资料的均方根误差变化

(a) 高度; (b) 温度; (c) 相对湿度

Fig. 3 RMS errors between analysis field of the first group test and soundings for (a) height, (b) temperature, and (c) relative humidity

小于控制试验,以下大于控制试验;而相对湿度场的均方根误差各层值都小于控制试验,且越往高层减小幅度越大。其次,对于分析场,除个别层次外 B1 与 D1 的误差变化幅度都大于 A1 与 C1,说明直接增加测站个数对背景场的调整更明显,同时,方案 A1 与 C1、B1 与 D1 的均方根误差值在各层都很相近,这主要由于它们同化的站点相同,只是在是否同化 GPS 大气可降水量上有差异,由于同化自动站资料时已经同化了相对湿度信息,而 GPS 大气可降水量信息的得到需要借助于自动站资料,所以增加 GPS 大气可降水量信息对分析场均方根误差的影响有限。对比 A1 与 C1 与探空观测资料的平均误差后,发现两个方案温度、位势高度的平均误差相同,相对湿度的平均误差不同,方案 C1 在各等压面层的平均误差略小于方案 A1,说明增加 GPS 大气

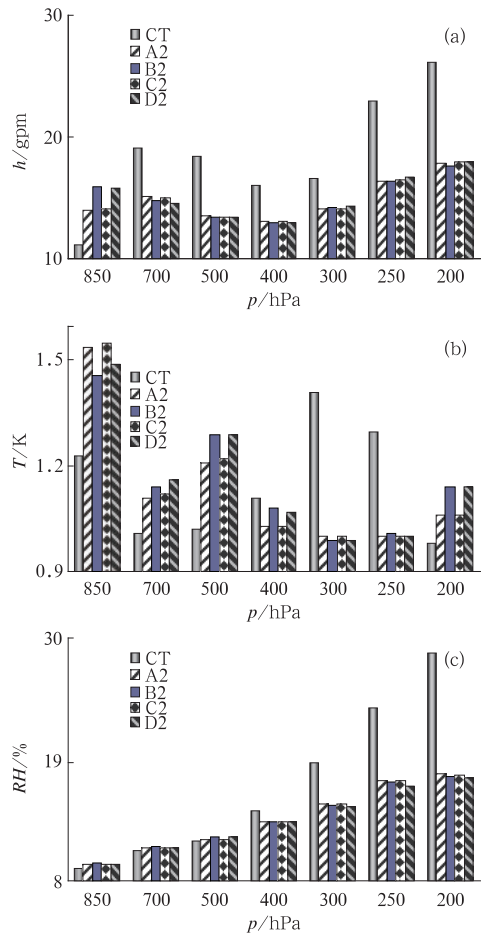


图 4 第二组试验分析场与探空观测资料的均方根误差变化

(a) 高度; (b) 温度; (c) 相对湿度

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the second group test and soundings

可降水量信息后能够减小相对湿度场的平均误差。

图 4 与图 3 类似,是第二组试验结果。发现它们的均方根误差变化幅度明显大于第一组试验,尤其在 500 hPa 以上。具体看,A2~D2 位势高度除 850 hPa 外均小于控制试验误差,且明显小于方案 A1~D1 结果;温度场除 200 hPa 外均方根误差变化趋势和第一组试验基本相同,只是变化幅度增大;相对湿度场的均方根误差变化也与第一组试验相同,只是越往高层误差减小的越多。由此看出,经过循环同化后,初始背景场受更多观测资料信息的影响,对 500 hPa 以上高度、温度、相对湿度场的均方根误差减小普遍有正作用。

综上所述,采用静态同化时,方案 A1 与 C1 的分析场在 500 hPa 及以上位势高度、温度、相对湿度场均方根误差比控制试验小,而方案 B1 与 D1 的分析场在 400 hPa 及以上温度、相对湿度场均方根误差普遍比控制试验小;同化时增加测站个数对分析场的调整作用比只增加 GPS 大气可降水量信息对分析场的调整更明显,调整幅度更大;采用循环同化时,观测资料对背景场的调整作用更明显,尤其是 500 hPa 以上(除 200 hPa 温度场外)三个要素场的均方根误差明显小于控制试验和方案 A1~D1。另

外,无论采用静态同化还是循环同化,这些观测资料对背景场的正作用都主要集中在 500 hPa 以上,这可能与测站的台站高度有关,24 个站的平均台站高度在 2550 m 以上,所以对误差减小的贡献主要集中在对流层中层及其以上。

3.2 降水预报检验结果

3.2.1 华北地区降水检验

表 1 是第一组试验在华北地区每 24 小时累积预报降水检验结果。由表 1 看出,无论控制试验还是同化试验,在区域 1 内降水预报的 TS 评分都较低,这可能与区域 1 比较靠近积分区域边界有关。在评分整体较低情况下,第一组试验 24 小时中雨和大雨、48 小时中雨量级的 TS 评分比控制试验高,但对暴雨量级除 B1 的 24 小时预报外,都比控制试验低;从漏报和空报率看,在该区域漏报、空报现象严重,同化了观测资料后,可以减小 24 小时中雨和大雨、48 小时中雨的漏报率;从预报偏差看,同化方案对 24 小时大雨、48 小时中雨量级的预报偏差减小有贡献。在降水预报改善的量级中,方案 B1 和 D1 对降水的改善作用比方案 A1 和 C1 大。

表 1 第一组试验在区域 1 的降水累积检验结果

Table 1 The verifying score of rainfall for the first group test in region 1

降水量级	试验方案	TS		PO		NH		BS	
		24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h
≥10 mm	CT	0.138	0.087	0.797	0.881	0.648	0.639	0.993	0.330
	A1	0.139	0.094	0.791	0.870	0.651	0.639	1.018	0.335
	B1	0.144	0.094	0.785	0.869	0.642	0.646	1.040	0.362
	C1	0.140	0.093	0.789	0.870	0.649	0.647	1.021	0.344
	D1	0.146	0.098	0.781	0.863	0.638	0.650	1.060	0.368
≥25 mm	CT	0.029	0.019	0.963	0.981	0.832	0.913	0.077	0.027
	A1	0.030	0.019	0.962	0.981	0.833	0.889	0.084	0.027
	B1	0.032	0.017	0.960	0.982	0.836	0.900	0.081	0.026
	C1	0.029	0.019	0.962	0.981	0.852	0.889	0.082	0.027
	D1	0.031	0.020	0.961	0.979	0.837	0.889	0.078	0.037
≥50 mm	CT	0.009	0.035	0.989	0.943	0.940	0.960	0.028	0.103
	A1	0.008	0.023	0.990	0.977	0.957	0.933	0.028	0.023
	B1	0.010	0.017	0.989	0.978	0.923	0.978	0.029	0.033
	C1	0.008	0.023	0.990	0.977	0.954	0.933	0.025	0.023
	D1	0.007	0.011	0.991	0.989	0.977	0.967	0.026	0.011

注:数值加粗表示该值比控制试验结果好。

从第二组试验在华北地区每 24 小时累积预报降水检验结果看(表略)。总体上,第二组试验在该地区的降水预报检验结果也不太理想,尤其是在前 24 小时只有方案 D2 在中雨量级的 TS 评分略有提

高,其余比控制试验还差;在后 24 小时,同化方案在大雨量级显示出整体优势,减小了漏报率和空报率。

从两组试验对华北地区的降水预报评分结果看出:第一组试验仅对中雨和 24 小时大雨预报有改

善,而第二组试验对 48 小时大雨预报有改善;在同化方案中,同化 24 个站点资料的方案比只同化 7 个站点的方案略好,而站数相同时,增加 GPS 水汽资料可以提高中雨预报准确率。

3.2.2 西南地区东部降水检验

图 5 给出第一组试验在区域 2 内累积降水检验评分。从 TS 评分看,方案 A1~D1 预报的 24 小时降水好于控制试验,尤其是方案 A1 和 C1,在中雨、

大雨量级 TS 评分明显提高;对 48 小时降水,同化方案没有表现出整体优势,只是个别方案在个别量级有提高,如方案 A1 和 C1 在大雨、大暴雨量级高于控制试验,但结合 BS 评分看,同化方案中雨、大雨量级的预报偏差小于控制试验。由此看来,在区域 2 内,采用静态同化,主要可以提高 24 小时降水预报准确率,其中方案 A1 和 C1 对中雨、大雨量级预报准确率提高较 B1 和 D1 明显。

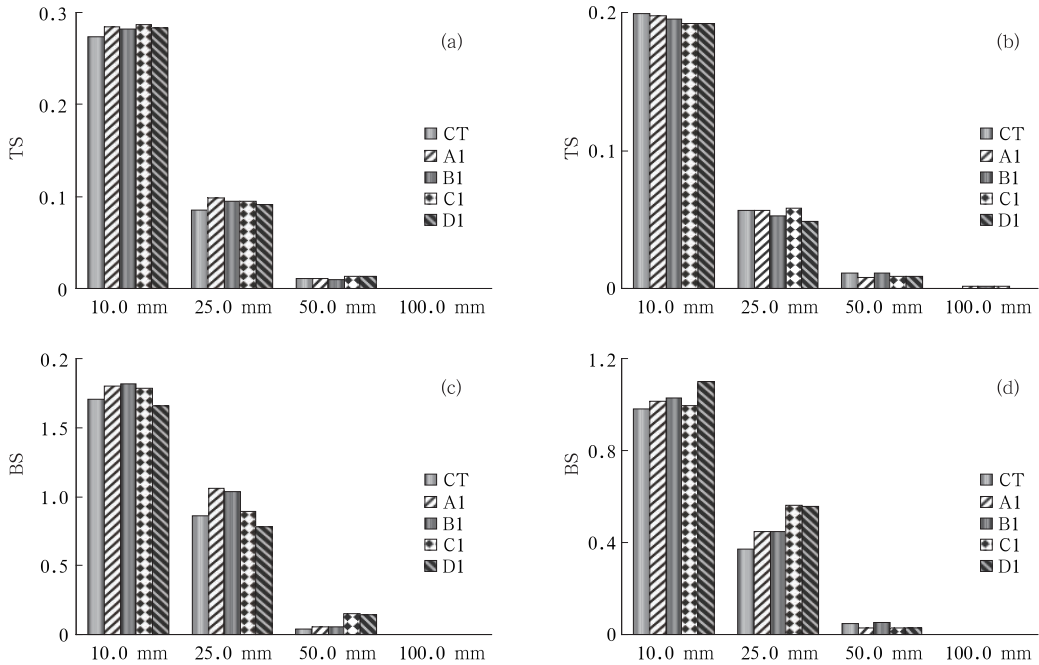


图 5 第一组试验在区域 2 的降水检验评分

(a) 0~24 小时的 TS; (b) 25~48 小时的 TS; (c) 0~24 小时的 BS; (d) 25~48 小时的 BS

Fig. 5 The verifying score of rainfall for the first group test in region 2

(a) 0-24 h TS, (b) 25-48 h TS, (c) 0-24 h BS, (d) 25-48 h BS

从第二组试验在区域 2 内累积降水检验评分(图略)可以看出:经过循环同化后,方案 A2~D2 的 24 小时预报降水 TS 评分没有第一组试验的好,中雨量级只有方案 A2 和 C2 好于控制试验,大雨量级只有方案 A2 和 B2 好于控制试验;而 48 小时降水结果相反,第二组评分结果明显好于第一组,尤其是方案 A2 和 C2,除中雨预报外都优于控制试验结果。

整体来看,采用静态同化,主要对西南地区东部的 24 小时降水预报有明显改善作用,而采用循环同化,会对西南地区东部的 48 小时大雨、暴雨预报有改善作用,同时发现在多数情况下只同化 7 个站观测资料的方案降水预报结果比同化 24 个站的更好。

3.2.3 长江中下游地区降水检验

图 6 和图 7 分别是两组试验在区域 3、每 24 小时累积降水 TS 评分。从图 6 看出,第一组试验 24 小时的 TS 评分都略高于控制试验,通过比较,方案 D1 除暴雨外提高的幅度最大;而 48 小时降水预报 TS 评分,没有像 24 小时那样显示出整体优势,如在中雨量级优于控制试验的方案依次为 D1、B1 和 C1,大雨、大暴雨量级只有 D1 和 B1 方案好于控制试验。从图 7 看出,在前 24 小时,第二组试验只是在雨量级整体高于控制试验,而在其他降水量级,只有方案 D2 都高于控制试验;在后 24 小时的 TS 评分中,同化方案在中雨、大雨量级比控制试验好,而在暴雨量级除方案 D2 外其他三个方案均优于控

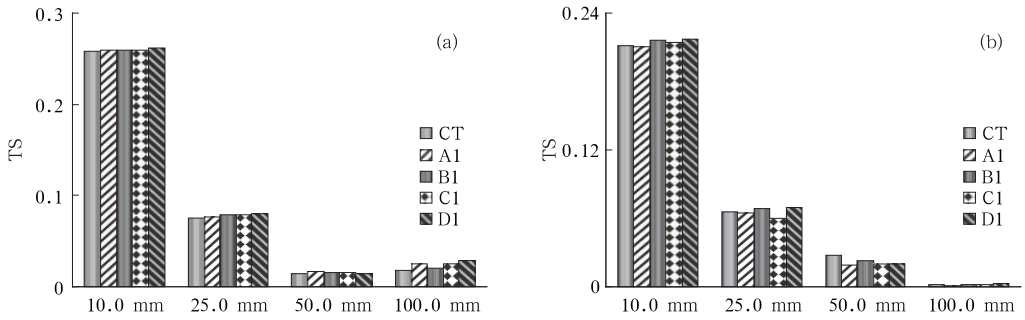


图 6 第一组试验在区域 3 的降水 TS 评分

(a) 0~24 小时;(b) 25~48 小时

Fig. 6 The TS score of rainfall for the first group test in region 3

(a) 0-24 h, (b) 25-48 h

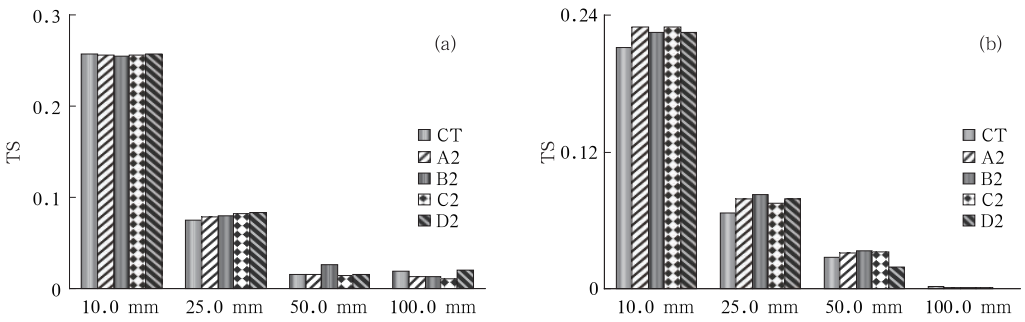


图 7 第二组试验在区域 3 的降水 TS 评分

(a) 0~24 小时;(b) 25~48 小时

Fig. 7 The TS score of rainfall for the second group test in region 3

(a) 0-24 h, (b) 25-48 h

制试验,大暴雨量级无改善。

由此可见,对于长江中下游地区,采用循环同化方式同化观测网资料预报的降水比采用静态同化方式更准确,尤其是对 25~48 小时降水,改善作用更明显;其次,在多数情况下,同化 24 个站的自动站和 GPS 水汽资料对降水预报改善比其他方案的更好。

4 结 论

本文利用静态同化和循环同化方式分别同化青藏高原地区新一代综合气象观测网的不同测站资料,探讨这些观测资料对我国夏季不同区域降水预报的影响,通过对 2008 年 6—7 月数值预报分析场和降水预报结果检验,得出以下主要结论:

(1)受测站台站高度影响,同化青藏高原地区新一代综合气象观测网资料后,对背景场调整的正作用主要集中在 500 hPa 以上,即对流层中层及其以上。采用循环同化方式,对背景场的调整作用比用

静态同化方式更明显,尤其是 500 hPa 以上(除 200 hPa 温度场外)。另外,增加测站个数对背景场的调整作用比站数相同、只增加 GPS 大气可降水量信息的调整作用更明显,调整幅度更大。

(2)无论采用静态同化,还是循环同化方式,同化该观测网自动站和 GPS 水汽资料对华北地区的降水预报影响有限,同时也没有对西南地区和长江中下游地区的影响明显。

(3)在西南地区东部,采用静态同化,对 24 小时降水预报有明显改善作用;采用循环同化,会对 48 小时大雨、暴雨预报有改善作用;同时发现多数情况下同化沿 99°E 附近的 7 个测站资料得到的降水预报结果比同化 24 个站的更好。

(4)对于长江中下游地区,采用循环同化方式更有利于该地区降水预报准确率的提高,尤其是对 25~48 小时降水,改善作用明显;其次,在多数情况下同化 24 个站的自动站和 GPS 水汽资料对降水预报改善比同化 7 个站的更好。

参考文献

- [1] 刘志飞,王成善. 青藏高原隆升对新生代全球气候变化的影响[J]. 大自然探索, 1998,17(65):30-33.
- [2] 罗会邦,陈蓉. 夏半年青藏高原东部大气热源异常对环流和降水的影响[J]. 气象科学, 1995,15(4):94-102.
- [3] 张人禾. El Nino 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用[J]. 高原气象, 1999,18(4):567-574.
- [4] 宋文玲,袁景凤,陈兴芳. 冬季高原积雪异常与 1998 年长江洪水关系的分析[J]. 气象, 2000,26(2):11-14.
- [5] 徐祥德,陈联寿,王秀荣,等. 长江中下游梅雨带水汽输送源汇结构[J]. 科学通报, 2003,48(21):2288-2294.
- [6] 段安民,吴国雄. 7 月青藏高原大气热源空间型及其与东亚大气环流和降水的相关研究[J]. 气象学报, 2003,61(4):447-456.
- [7] 陈忠明,闵文彬,刘福明. 青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的关联[J]. 气象, 2003,29(2):9-12.
- [8] 刘晓冉,李国平,程炳岩. 青藏高原前期冬春季地面热源与我国夏季降水关系的初步分析[J]. 大气科学, 2008,32(3):561-571.
- [9] 华维,范广洲,周定文,等. 青藏高原植被变化与地表热源及中国降水关系的初步分析[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2008,38(6):732-740.
- [10] 徐祥德,陶诗言,王继志,等. 青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002,60(3):257-266.
- [11] 于淑秋,王继志,丁国安. 中日 JICA 计划项目——我国高原及周边新一代气象灾害综合监测网系统建设取得进展[J]. 气象学报, 2007,65(6):1011-1012.
- [12] 彭世球,徐祥德,施晓辉. “世界屋脊”大地形坡面探测同化信息对下游天气的预警效应[J]. 科学通报, 2008,53(24):3134-3138.
- [13] 施晓辉,徐祥德,程兴宏. 2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征[J]. 气象学报, 2009,67(3):478-487.
- [14] 龚建东,魏丽,陶士伟,等. 全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用 I:观测空间协方差的准确估计[J]. 气象学报, 2006,64(6):669-683.
- [15] 范水勇,张朝林,仲跻芹. MM5 三维变分系统在北京地区冷暖季背景场误差的对比分析[J]. 高原气象, 2006,25(5):855-861.
- [16] Parrish D F, Derber J C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(8):1747-1763.
- [17] 王雨. 2002 年主汛期国家气象中心主客观降水预报对比检验[J]. 气象, 2003,29(5):21-25.