

青藏高原东部定量降水数值预报试验 及业务化应用评估*

钟晓平

卿清涛

(四川省气象局,成都 610072) (四川省气象科学研究所,成都 610072)

提 要

该文运用 LASG η 坐标有限区域数值预报模式在青藏高原东部的川、渝两省市进行了定量、定点降水预报的数值模拟敏感性研究和准业务化试验,并根据中国气象局的有关规定对结果进行了评估。经过对比分析发现:低纬度的天气系统与其活动特性,对该地区定量、定点降水数值预报有着重要影响;同样的物理过程和地形影响处理方式在不同的天气过程中对降水量的影响有显著差异;可选用适当的客观分析方法,通过强调距格点最近的站点的影响来尽量保持高、低值系统的极值,从而改进预报效果。准业务化试验结果表明:LASG η 坐标模式以其比较完善的动力框架和物理过程处理方法在这个地形复杂、天气系统多变的区域内可获得较好的预报结果,特别是晴雨预报可获得较高的 TS 评分,并能对某些客观预报难度较大的天气过程做出较好的预报。

关键词:青藏高原 η 坐标 有限区域模式 定量降水数值预报 客观分析 业务化试验

引 言

随着对天气预报要求的不断提高,有限区域内的天气要素,特别是降雨量的定量、定点预报已逐渐成为日常预报中的重要内容。由于主观预报方法本身具有的局限性,在较大范围内的定点预报必须建立在数值预报产品的基础上,这种需求和特点促使定量、定点降水数值预报的不断发展。

经过多年来的探索与努力,数值模式在定量降水预报上已经打下了较为坚实的基础,包括我国的 LAFS 和 HLAFS 在内的许多有限区域数值预报模式在这方面都获得了较好的进展。武汉暴雨研究所利用中国科学院大气物理研究所的 σ 坐标有限区域降水数值预报模式进行的江淮流域降水的业务预报^[1];蔡则怡等对 1975 年 8 月河南地区由登陆台风引起的特大暴雨的数值模拟^[2];宇如聪利用 η 坐标有限区域模式对 1993 年中国汛期降水的业务化预报试验^[3]等针对我国部分地区的具体地理环境和天气气候条件进行了有益的探索,为在业务上使用数值模式制作定量降水预报打下了一定基础。

众所周知,青藏高原是地球上最高、地形最复杂的高原,其东部是低纬和中高纬天气系统相互作用最为显著的地区,也是高低空天气系统、四川盆地与高原的天气系统相互作用最为复杂的地区,对东边紧邻地区四川省和重庆市的降水有极为重要的影响。要在这

* 1999-04-29 收到,2000-05-09 收到修改稿。

一区域获得较好的定量、定点降水数值预报结果,特别是要在天气预报的日常业务工作中使用这种预报,必须在模式中妥善处理当地独特的地形影响和大气物理过程。本文使用中国科学院大气物理研究所研制的 η 坐标有限区域数值模式(LASG η 坐标模式)在青藏高原东部地区进行了定量降水的敏感性研究和准业务化试验,以探讨利用该模式在该地区进行定量、定点降水数值预报业务化的可能性。

1 模式概况

LASG η 坐标有限区域数值预报模式^[4]垂直坐标选用 η 坐标,具有能量和质量守恒的动力框架,使用E型网络作为变量的水平分布形式,对E网格的分离进行了特殊的处理,对两个子网格来说,模式的水平分辨率为 1×1 的经纬格点。模式实际的水平分辨率约为75 km。垂直方向模式顶为100 hPa,从地面到模式顶根据 η 坐标等分为8层,每层的具体高度从下往上约为977,2060,3279,4681,6342,8404,11179,15667 m。模式考虑了大尺度凝结降水、水平扩散、垂直通量输送、地面辐射收支和边界层参数化等物理过程;且使用Betts的对流调整方案计算对流降水。

模式的初始场取自该范围内所有探空站的原始资料,用加权平均的客观分析方法,先将各站点的观测资料内插到等压面的水平网格点上,然后再把等压面上的要素值线性插值到模式层。地面要素的客观分析方案是将台站高度和气象要素值同时分析到各网格点,然后再订正到模式地形高度上。模式地形高度分布见图1,有3个区域的高度达到7000 m以上。

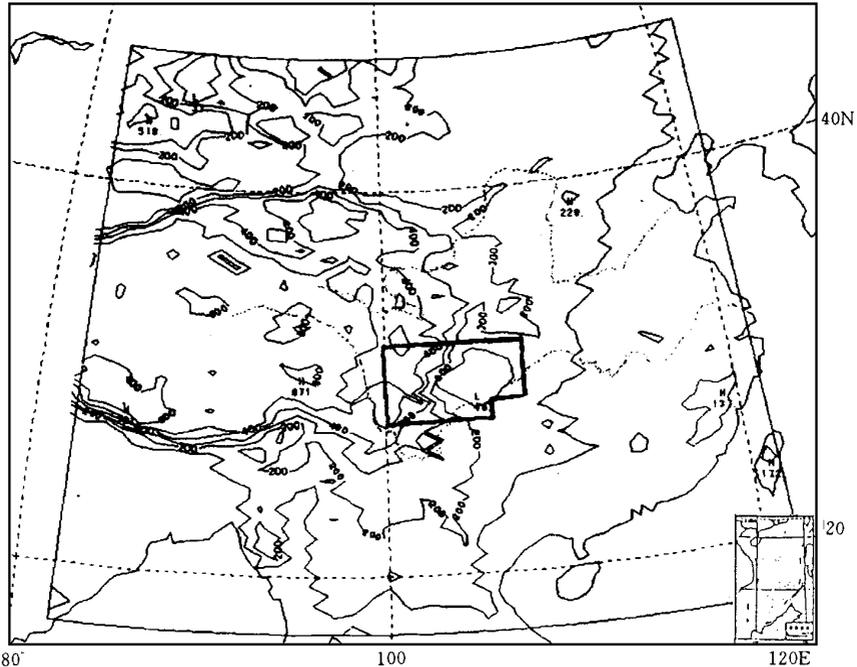


图1 地形高度、模拟区域和检验区域(地形高度单位:10 m)

LASG η 坐标有限区域数值预报模式考虑了我国复杂的地形作用。目前大多数的数值预报模式使用 σ 坐标作为垂直坐标,将地面处理成一个坐标面,无论地形多么复杂,坐标面与地面都不会相截。因此,地形越陡, σ 坐标面越倾斜,造成的计算误差也就越大,从而影响模式结果的精确性,甚至导致数值预报的失败。 η 坐标把地形设计成三维网格块构式的阶梯状。模式内部形成刚体的侧边界。使坐标面保持准水平状态,避免了陡峭情况下, σ 面过于倾斜的缺陷,同时保持了 σ 坐标较简单的下边界条件的优点。1986 年中科院大气物理研究所曾使用该模式成功地模拟了青藏高原背风气旋的发生发展和著名的“雅安天漏”现象。1996~1997 年,湖北省气象局在“大江截流”课题中,使用该模式预报冬季长江三峡地区的降水取得了较好的结果。湖南省气象局 1997 年夏季使用 LASG η 坐标有限区域数值预报模式预报降水,也取得了较好的效果。

2 预报结果检验

检验方法取自中国气象局的“数值天气预报模式业务化评审暂行方法”(讨论稿,1998)中有关降水预报的检验方案。运用其中的 4 个统计检验量,即 TS(TS 评分),PO(漏报率),NH(空报率),和 B(预报偏差)对 24 h 模式降水预报场进行统一评估。

考虑到国家统一发报的站数太少,空间尺度太大,同时也是为了更好的检验数值模式对较小的有限区域内降水的定量预报能力,将检验区域(以下称为目标区域)选为四川和重庆两省市,用于对比分析的雨量观测资料为两省市所有的地面气象观测站的日雨量观测资料,共计 191 个站点。观测站点空间平均间距约为 40 km,最密的地方不到 20 km。

评估方法仍然采用上述暂行办法中的站点检验法,即以观测站点的实况雨量作为评分参考,使模式格点的预报值向站点逼近。站点处的预报降水量采用两种方法获取。如果站点离最近的格点距离小于 20 km,则把最近的格点的预报值作为站点的预报值;否则取站点周围的 4 个格点值客观地插值到站点,作为该站点的预报值。考虑到边界上格点的需要,目标区域取为略小于四川和重庆两省市的范围,由分别以 32°N 、 100°E 、 29°N 、 108°E 和 29°N 、 100°E 、 28°N 、 106°E 为对角点的两个矩形组成(图 1)。根据目标区域内的站点分布情况,对于客观分析法,该区域内共计有 178 个格点参与计算检验统计。

雨量按大小分为 6 种情况(表 1)进行统计检验。其中第 1 种情况(G.0)实际上相当于有雨的预报。等级 1 到 5 分别相当于小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨及以上。

表 1 雨量等级划分

等级	雨量范围(mm)	等级	雨量范围(mm)
G.0	0 ~ 9999	G.3	25 ~ 50
G.1	0 ~ 10	G.4	50 ~ 100
G.2	10 ~ 25	G.5	> 100

3 敏感性模拟试验及其结果分析

3.1 敏感性模拟试验

模拟试验分为 3 组。第 1 组考虑目标区域处在模拟范围中的不同位置,包含 3 个试验:

试验1: 模拟区域左上角为 $47^{\circ}\text{N}, 82^{\circ}\text{E}$. 目标区域位于模拟区域的中心, 其边界距模拟区域最近为 14 个经度。

试验2: 模拟区域左上角为 $45^{\circ}\text{N}, 92^{\circ}\text{E}$. 目标区域位于模拟区域的左上角, 其边界距模拟区域最近为 8 个经度。

试验3: 模拟区域左上角为 $57^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}$. 目标区域位于模拟区域的右下角, 其边界距模拟区域最近为 6 个纬度。

在本组试验中, 形成初始场的客观分析方法都采用原模式引进时所使用的包含 2 次修正的高斯权重法。

第 2 组模拟试验考虑不同客观分析方法形成的初始场对模拟结果的影响, 除包含第 1 组中的试验 1 外, 设计了 4 个试验。在这 4 个试验中运用[5]的基本方法, 不采用高斯权重法中的 2 次修正。为突出距格点很近的站点的影响, 当距格点 50 km 以内有观测记录时, 直接使用该观测记录作为该格点处的相应要素值(如有多站则取最近的一个); 模拟区域的左上角均为 $47^{\circ}\text{N}, 82^{\circ}\text{E}$. 4 个试验分别如下设计:

试验4: 权重为

$$W_i = \frac{1}{\left| \frac{R_i}{C_0} \right|^n + 1} \quad (1)$$

其中, $C_0 = 500 \text{ km}$, R_i 为站点到格点的距离, $n = 5$ 。

试验5: 权重形式与试验4一样, 但用 $R_i - R_1$ 取代 R_i 。 R_1 为距计算格点最近的站点的距离。 C_0 取为 50 km。

试验6: 权重为

$$W_i = \exp(-C_0 R_i^2) \quad (2)$$

其中 $C_0 = 0.2741557$ 。

试验7: 使用试验6的权重形式, 但和试验5一样, 用 $R_i - R_1$ 取代 R_i 。

第 3 组考虑不同地形高度的影响, 除同样包含试验 1 外, 另外两个分别是:

试验8: 同试验 1, 但将 3000 m 以上的地形高度全部改取为 3000 m。

试验9: 同试验 1, 但将所有地形高度全部取为 0。

敏感性试验的样本个例取自 1998 年 4~9 月, 为该时段目标区域内出现的较大降水过程。具体时间见表 2。

表 2 降雨两个例时间表

序号	时间(UTC)	序号	时间(UTC)
1	1998-04-27-00:00	10	1998-08-01-00:00
2	1998-04-28-00:00	11	1998-08-18-00:00
3	1998-06-26-00:00	12	1998-08-19-00:00
4	1998-06-27-00:00	13	1998-08-25-00:00
5	1998-07-04-00:00	14	1998-08-26-00:00
6	1998-07-05-00:00	15	1998-09-16-00:00
7	1998-07-19-00:00	16	1998-09-17-00:00
8	1998-07-20-00:00	17	1998-09-18-00:00
9	1998-07-31-00:00	18	1998-09-19-00:00

3.2 目标区域和模拟区域的相对位置

当目标区域位于模拟区域的左上角并与边界相隔一定距离时(即试验 2),其总体预报结果在这一组试验中效果最好(表 3),TS、PO、HE 和 NH 这 4 个指标均优于其余两个试验。也就是说,当低纬的天气系统能获得更多、更全面的处理时,对降水的模拟更接近真实情况。这一事实表明,在盛夏,四川盆地这个复杂地形中的特定区域在低纬和中高纬环流系统交互影响下,其降雨过程的物理机制是比较复杂的,相对来说,在多种影响因子之中,来自南边的低纬天气系统和与其相伴的暖湿气流比来自中高纬度的天气系统的影响更重要一些。

表 3 目标区处于模拟区中不同位置时的评估结果

		G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
TS	试验 1	0.691	0.353	0.108	0.061	0.037	0.000
	试验 2	0.720	0.379	0.112	0.074	0.026	0.019
	试验 3	0.708	0.353	0.085	0.070	0.045	0.009
PO	试验 1	0.135	0.428	0.757	0.653	0.647	0.389
	试验 2	0.129	0.408	0.733	0.639	0.667	0.361
	试验 3	0.122	0.419	0.778	0.643	0.623	0.361
NH	试验 1	0.221	0.499	0.659	0.641	0.386	0.056
	试验 2	0.194	0.483	0.723	0.659	0.346	0.028
	试验 3	0.201	0.498	0.701	0.625	0.321	0.156
B	试验 1	1.234	1.283	0.945	1.336	0.357	0.000
	试验 2	1.139	1.210	1.021	1.225	0.310	0.056
	试验 3	1.217	1.267	0.981	1.228	0.649	0.194

3.3 不同客观分析方法的结果

众所周知,在数值模拟方面,初始场对模拟结果有很大的影响。钟晓平在文献[5]中已经指出,以加权平均为基础的客观分析方法一定要着重考虑离格点最近的站点的观测值,这可通过权重计算公式的选择来予以强调;而且当一个站点离格点很近时,可以考虑直接用这个站点的观测值作为格点处的要素分析值。这种方法对于空间分布极不均匀的降水量都可获得较好的结果。本组试验的结果也证实了这种观点有助于提高数值预报的准确率。在所有不同的客观分析方案中,试验 5 表现出了最好的预报效果(表 4)。在试验 5 中,不仅融入了上述想法,而且将计算权重时经常用到的站点到格点的距离作了一个变换,用某一站点到格点的距离与距格点最近的站点到格点的距离之差来计算权重。这实际上是让距格点最近的站点始终具有最大的权重系数 1,确保了 this 站点(不管它离格点的实际距离究竟有多大)的观测数据对格点处的分析值有最大的影响力,而且各站点的影响力仅随它们之间的相对距离的变化而变化,不随它们距格点的绝对距离的改变而改变。上述这种考虑对气象要素场中的极值有较大的保真作用,和常用的客观分析方法相比,它的高、低值系统中心更为接近实际情况。因此,以此为基础获得的初始场也应该导

致较好的准确性。

表 4 不同客观分析方案的 TS 得分

	G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
试验 1	0.691	0.353	0.108	0.061	0.037	0.000
试验 4	0.725	0.327	0.101	0.067	0.020	0.000
试验 5	0.738	0.376	0.097	0.098	0.022	0.006
试验 6	0.681	0.365	0.094	0.076	0.037	0.007
试验 7	0.693	0.357	0.100	0.065	0.033	0.000

3.4 不同地形高度下的模拟结果

本组试验的结果与以往很多关于地形的数值模拟结果有不一致的地方。在某些具体的个例中,的确表现出了模拟地形越接近实际,模拟结果越好的特点(表 5);然而从多个个例的总体情况来看,这一特点并不明显。对不同的雨量等级,这几个试验的 TS 评分各有优劣(表 6);漏报率是无地形时最低;空报率是地形高度居中时最低;而预报偏差则是不改变现有地形高度时最优。

表 5 试验 1、8、9 对 1998 年 8 月 1 日个例的 TS 评分

	G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
试验 1	0.993	0.404	0.273	0.192	0.208	0.000
试验 8	0.993	0.333	0.262	0.186	0.167	0.000
试验 9	0.993	0.098	0.217	0.189	0.167	0.000

表 6 不同地形高度模拟试验的 TS 得分

	G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
试验 1	0.691	0.353	0.108	0.061	0.037	0.000
试验 8	0.747	0.276	0.129	0.062	0.034	0.000
试验 9	0.714	0.363	0.093	0.099	0.035	0.000

3.5 两个较优试验的评估结果分析

敏感性试验结果最好的是试验 2 和试验 5。对有无雨预报的 TS 评分在两个试验中均超过了 0.70,小雨、中雨和大雨的 TS 评分分别在 0.38、0.10 和 0.08 左右,暴雨和大暴雨这两个等级则分别为 0.02 和 0.01 左右。两个试验的漏报率和空报率有同样的趋势:相对来说 G.2 和 G.3 较差,G.0、G.1 和 G.5 较好。G.0 和 G.1 较好的原因可归结于模式对这种量级的降雨预报效果较好(相应的 TS 评分和预报偏差 B 都比较好),而 G.5 较好的原因则应归结于样本数较少所致,特别是漏报率 NH,大暴雨本来就难以出现,只要能报出一二次,当然就能大大减小漏报率;相应的 TS 评分和预报偏差 B 都比较差也能证明这一点。

4 准业务化试验结果分析

根据敏感性研究的结果,选用试验 2 的目标区域安排和试验 5 的客观分析方案,利用 1998 年 7、8 两月的资料进行了准业务化试验,并且于 1999 年 8 月在四川省气象台由预

报人员进行了实时的业务化试验。

表 7 是 1998 年 7 8 月的准业务试验评估结果。从中可以看出,由 TS 代表的逐点晴雨预报效果最好,高达 0.685。对于小雨,TS 评分为 0.355,预报效果也不差。对中雨和大雨,分别为 0.106 和 0.074,两者相差很小,说明在这种评估方式下,本模式对中雨和大雨的预报能力差不多。相对于暴雨和大暴雨,TS 评分分别只有 0.041 和 0.000,这表明模式对高强度降水的预报能力较差。

漏报率 PO 与 TS 评分有共同的特点:晴雨预报,小雨预报的漏报率较低,特别是晴雨预报的漏报率仅为 0.077,可以说是很理想;而大暴雨的漏报程度就高得多,一个点也没有报出来。空报率 NH 也表现出了从 G.0 到 G.5 预报效果逐步变差的特征。小雨预报的空报率从晴雨预报时的 0.318 变为 0.551,增大了 2/3 左右;中雨预报的空报率比小雨预报又增大了近 2/3。

预报偏差的特点与前 3 个统计评估量都有区别。中雨和暴雨等级的预报偏差比较接近,比理想值 1 偏大 20%左右。晴雨预报和小雨预报的预报偏差也相差不大,比理想值高出 30%~40%。只有大暴雨的预报偏差特别的大。

表 7 1998 年 7 8 月准业务试验评估结果

	G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
TS	0.685	0.355	0.106	0.076	0.041	0.000
PO	0.077	0.372	0.787	0.820	0.915	1.000
NH	0.318	0.551	0.825	0.883	0.926	1.000
B	1.354	1.400	1.222	1.536	1.154	0.063

1999 年 8 月的实时业务试验的评估结果和表 7 给出的结果基本相似,表 8 给出了其中的 TS 评分。该时段内对晴雨、小雨和中雨的预报还优于 1998 年 7 8 月的试验,但对大雨以上等级的预报却不如后者。值得注意的是,使用本模式结果的预报员指出,1999 年 8 月 11 日和 8 月 27 日四川盆地西南部和西部的暴雨过程分别是在四川盆地有 6~8 hPa 的正变压的情况和大气能量很低的情况下产生的,这种特殊条件使得有经验的预报员在主观上都感到很难把握,本模式却对这两次过程都做出了正确预报。

表 8 1999 年 8 月实时业务试验的 TS 评分

	G.0	G.1	G.2	G.3	G.4	G.5
TS	0.721	0.460	0.141	0.055	0.000	0.000

总的来看,该模式在川渝两省市对晴雨和小雨、中雨、大雨的预报有着较高的准确率,对暴雨和大暴雨的预报能力较差。不过,要客观地评价暴雨和大暴雨的预报准确率时不得不考虑样本数量的影响。事实上,大暴雨的样本数量远远低于小雨或中雨的样本数量,在前者中一个样本对总体特征的影响力远远超过在后者中的影响力,只要报错一个样本,就会导致检验统计量出现大幅度的变化。

5 总 结

(1) 采用 LASG_η 坐标有限区域数值预报模式制作川渝两省市的有限区域定量降水

预报是可行的。在结果较好的试验中,TS评分在一些量级上已经超过主观预报的水平。

(2) 对川渝两省市而言,降水定量数值模拟的范围特别要注意包含低纬度地区。该地区的暖湿气流内所具有的能量、不稳定性和水汽对川渝两省市的降水有着重要的影响。

(3) 求取数值预报初始场的客观分析方法中要注意尽量保持原有高、低值系统的极值,这可以通过选择不同的权重计算公式和距离选择方法来实现。

(4) 从总体上来看,用 LASG η 坐标有限区域数值预报模式制作川渝两省市的定量降水数值预报时对地形高度并不十分敏感;仅在某些个例中表现出了地形高度敏感性。这需要进一步探索影响降水的详细物理过程和地形所起的作用如何在数值模式中获得更好的表达。

(5) 准业务化运行试验表明:用 LASG η 坐标有限区域数值预报模式进行川渝两省市有限区域定量降水预报是可行的。模式在自动化运行、个例适应性和运行时限上都不存在问题。该模式在不同雨量等级的预报能力与其它模式一样,雨量较小时的预报能力高于雨量较大时。对有些统计量,模式对大雨的预报还强于对中雨的预报。从整体上看,TS评分可在多个量级上超过主观降水预报的水平,晴雨预报的TS得分更高达0.685。如果在局部地形影响、物理过程的处理上再根据青藏高原东部地区的特点作进一步的改进,预报能力还会有较大的提高。在晴雨预报中的漏报极少,空报也比较少,而大暴雨的漏报、空报都很多。空报率从晴雨预报到小雨预报和从小雨预报到中雨预报几乎都是增加一倍,从中雨到暴雨再到暴雨就基本上没有什么变化。

参 考 文 献

- 1 胡伯威,匡本贺.1996年汛期暴雨数值试验.气象,1996,12(1):14~15.
- 2 蔡则怡,宇如聪.LASG η 坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验.大气科学,1997,21(4):459~471.
- 3 宇如聪.一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的业务化试验.大气科学,1994,18(3):284~292.
- 4 Yu Rucong, Zeng Qingcun. The design of a limited area model with steep mountains and its application to the heavy rain simulations in the east periphery of Tibetan Plateau. 22nd International Conference on Alpine Meteorology, Toulouse (France), Sep., 1992. 316~320.
- 5 钟晓平.一种违反常规的客观分析方法.见:83-906-01 课题组编.台风、暴雨灾害性天气的探测,数据采集技术的研究.北京:气象出版社,1996.

NUMERICAL SIMULATION OF PRECIPITATION IN THE EASTERN TIBETAN PLATEAU WITH LASG MESOSCALE MODEL AND ITS OPERATIONAL APPLICATION EVALUATION

Zhong Xiaopiny Qing Qingtao

(*Meteorological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610072*)

Abstract

The sensitive numerical simulating study and the quasi-operational experiment are made on heavy precipitation over the eastern Tibetan Plateau by means of the LASG η coordinate area-limited mesoscale model with different schemes, and the results are evaluated according to the related regulations of the Chinese Meteorological Administration. The comparison and analysis indicate that the weather systems in the low latitudes with active features have important influence on the quantitative and fix-point precipitation prediction; in the same way, the effect of methods for processing physical processes and topographic influence on the precipitation prediction varies greatly with different weather processes. Through emphasizing the influence of the closest station to the grid point, the extremes of high and low-value systems are retained by using appropriate objective analysis methods, so to improve the forecasting performance. The quasi-operational experiments indicate that with the relatively perfect dynamic frame and the processing methods of physical processes, the LASG η model performs well in such areas with a complicated topography and highly varied weather systems, especially in the clear-rainy forecast. Moreover, the model can be used to make reasonable forecast in some different cases.

Key words: Tibetan Plateau η coordinate Area-limited numerical forecast model Quantitative precipitation forecast Operational experiment