

青藏高原的不同地形方案对天气系统影响的数值试验

刘 还 珠

(国家气象局北京气象中心)

提 要

利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的有限区域模式,检验了青藏高原对东亚大气环流的动力作用,结果表明,高原对冷暖空气的阻隔是我国西北地区很少出现气旋的重要原因,如果没有青藏高原,西北地区会有气旋强烈发展。西风槽的结构,西太平洋副热带高压的进退等对高原动力作用十分敏感;近地面次天气尺度系统及平流层上庞大的南亚高压也明显地受高原影响。

作者认为,在数值模式中,地形在垂直方向过度地平滑及在水平方向的过度扩张,会造成在模拟不同尺度系统动力效应时出现失真,从而导致预报误差的增大。

一、引 言

1982年8月28—31日,甘肃东部出现了较大范围的大暴雨天气。在降水最强时段(29日00时至30日00时)雨强中心位于 32°N 、 107°E 附近,日雨量达94mm。

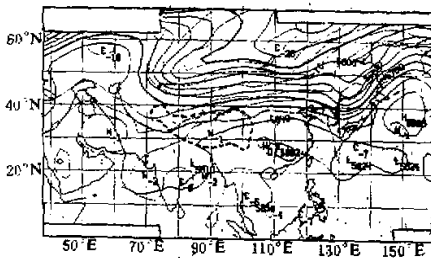


图1 1982年8月30日00时 500hPa
高度场及温度场实况

8月26日以前,200hPa南亚高压中心位于 100°E 以西、北纬30度附近,东亚环流形势为“西部型”。在500hPa上西风带位置偏北,低槽位于西伯利亚到威海一线,其南段切断为低涡。青藏高原上空为暖高压控制,中国西北部东部处伏旱少雨时期。

26日以后,200hPa南亚高压中心北移到 32°N 。500hPa上西亚的低涡减弱蜕变为槽并伴随冷锋向东南移动(图1)。此后西太平洋副热带高压西进,其西北部的西南气流与北上的孟加拉湾低压(中心位于 22°N 、 86°E)东部的南风在高原的东南侧形成一股较强的偏南风气流;并与北部偏西气流间形成辐合带。与此对应,在低层,700hPa上孟加拉湾热低压猛烈发展加深,其东侧有偏南风吹向高原。同时高原暖中心的东侧有热低压发展,范围不断扩大,其东部在

35°N 附近形成西南风与东南风间东西向的切变线,降水在此切变线附近产生。而后冷空气进入柴达木盆地,并向高原东侧移动,使切变线附近的上升运动迅速发展,产生不稳定性强降水。这时 200hPa 南亚高压中心移至 110°E 附近,西太平洋副高盘踞大陆东岸,高原上多低气压系统活动,中国西北区东部由伏旱转入盛夏多雨段。

为了分析大地形对本次天气过程的影响,这里利用 ECMWF 的有限区域 N 48 中期预报模式^[1]进行 48 小时预报试验。模式网格为 1.875 经距×1.875 纬距,积分区域为 0.0—69.375°N、37.5—159.375°E,时间步长为 15 分钟,积分初始场为 8 月 28 日 00Z ECMWF 库存资料。在本试验中,模式的热力过程包括次网格物理过程的参数化,诸如积云对流、边界层扩散等均保持不变。所改变的只是地形的高度和分布,这种变化在模式最初 12 小时的时间积分中逐渐缓慢实现,以保证各要素之间较合理的相互调整。

二、青藏高原及东亚锋区气旋

为研究对气旋生成的影响,我们采用包络地形 (ENV) 和无地形 (NOM) 方案进行对比试验。

ENV 方案为原有平滑地形方案 (SMO) 加一表征粗糙高度而得^[2],模式中青藏高原上最大高度达 7000 米以上。在其 48 小时预报图上东亚几个主要天气系统与实况大致相符,但对流层上层南亚高压中心位置偏南、偏西 (参见图 3)。500hPa 上原在西亚的低压槽减弱较快,呈横槽形式,对应的锋区位于高原北侧近东西走向,较实况强。位于高原以西的槽偏浅偏东,而处于东亚沿海的槽却偏深偏西。西太平洋副高太弱,中心偏南,从高原到南亚出现大范围的暖性低压 (参见图 3)。热低压在 700hPa 上表现得更为突出,不仅范围大,而且较实况深,中心强度达 300 位势什米 (10gpm),并具有两圈闭合的等高线。高原东侧的偏南风气流较窄,位置偏西,约在 106—108°E 间。24 小时 (29 日 00Z 到 30 日 00Z) 降水中心强度偏弱,为 46mm,位置与实况较为接近。

在 NOM 例中,12 小时后再在 700hPa 和 500hPa 图上,原位于欧洲高压脊前的西亚

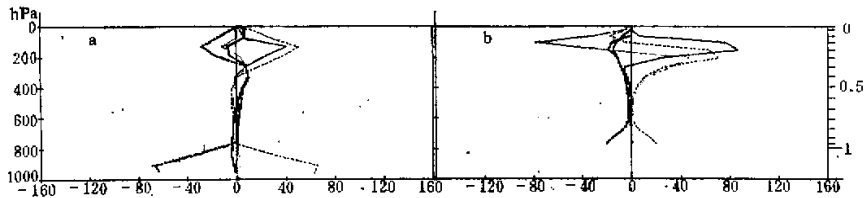


图 2 动能收支垂直分布图

a: NOM 试验(区域为 35—58°N, 85—125°E, 36—48 小时预报); b: ENV 试验(区域为 37—50°N, 85—120°E, 36—48 小时预报)。单位: Wm^{-2} , 起始时间为 1982 年 8 月 28 日 00 时。

细虚线: 转换项, 粗虚线: 余差项, 点线: 垂直通量辐散项, 细实线: 水平通量辐散项, 粗实线: 局地变化项
冷空气南下, 西亚槽转为竖槽, 槽底达 30°N, 锋区呈东北—西南走向 (参见图 3)。在 1000 hPa 上形成较深的气旋, 中心位于 36°N、95°E, 相应地面冷锋进入青藏西部, 暖锋位于青藏北部 (图略)。28 日 12Z 以后气旋向东北方移动。至 30 日 00Z 气旋中心达蒙古中

部,冷锋在 80°E 附近已南下到 30°N 以南,暖锋位于中国东北区。西风槽占据了高原西部,西太平洋副高向西北推进,成为强大的天气系统。青藏上空在对流层中低层热低压及切变线之类的天气系统消失。同时 200hpa 南亚高压向东北方向移,中心达 37°N 、 112°E (参见图 3)。由于冷锋附近湿度较小,故主要降水区在偏南地方的暖区内,且量级较小。

为研究该系统的性质,我们用下述方程分析了其生成过程中在闭合区域内、冷暖锋附近($35-58^{\circ}\text{N}$ 、 $85-125^{\circ}\text{E}$) 的动能平衡:

$$\frac{\partial}{\partial t} (P_i K) = -\nabla_{\sigma} \cdot (P_i K \vec{V}) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (P_i K \dot{\sigma}) - P_i \vec{V} \cdot (\nabla_{\sigma} \phi + R T \nabla_{\sigma} \ln P_i) + P_i R \kappa$$

这里 P_i 为场面气压, $\sigma = P/P_s$, 而 K 表示总动能。式中右边各项分别表示动能的水平垂直通量辐合项、动能的制造项及动能的源和汇^[9]。图 2a 给出了初始场后 36—48 小时在该区域内上述各项的贡献。动能制造项(主要是扰动动能,图 2a 中细虚线)在近地层比较大(最大中心在低压的暖区内,图略)。由于近地面层垂直运动小,故动能制造主要来自趋向低压的位势辐合,由气压梯度力做功所致。在该区域上空还有一个极大值位于高空急流入口区的右侧(图略)。在入口区附近存在强的次级垂直环流,其上空有从高位势向低位势吹的次地转风,位势梯度力做功的结果制造了动能。因而在对流层上层制造项大于水平辐合项,它们在与垂直辐合项共同作用下,总的效应是使对流层上层动能增加(图 2a 粗实线)。此外在对流层中层沿 $50-53^{\circ}\text{N}$ 垂直运动和温度的相关在低压东部有一相对大的中心,这可理解为是与斜压不稳定位能转换成动能相联系的。总之能量分析表明该系统具有气旋的特征,且其发展过程与江淮气旋极为相似。

由此可见,在无地形作用下,冷空气能无阻挡地进入青藏与暖空气交绥,强斜压作用蕴藏的相当可观的位能在此得到了释放,在有限区域内位势能量的输送使得这里动能猛烈地增加,近地面气旋因而强烈地发展。

对 ENV 进行相似的计算,得到图 2b 的结果。它与 NOM 间相差显著的是近地层能量制造小得多,尽管在对流层中层锋区附近也有较强的位能释放(图略),但它比指向低压的位势能量输送小。这意味着由于地形的阻挡,冷暖空气难以在高原内部交绥,这是有地形时不可能在高原上形成气旋的主要原因。尽管有垂直运动将低层动能向高层辐合,但因为水平辐散过大,总的效果是高层的总动能增加不多,12 小时后这里的动能反而是减小的,这也是与 NOM 的一个主要区别。

天气实践指出东亚地区的气旋主要发生在两个地带,一个是 $30-35^{\circ}\text{N}$, 另一个是在 $45-50^{\circ}\text{N}$, 与东亚南北两支锋带相一致。处于我国大陆以西很少有气旋生成。本试验表明如果没有青藏高原,强气旋可以在中国西部发展。

三、地形与中、低空的天气系统

为研究地形对中、低空系统的影响,除 ENV 和 NOM 外,这里引入了三种地形方案。

1. 3/4 平滑地形 (3/4 SM)

该模式中,地形是由原有业务模式平滑地形降低 1/4 而得。试验表明,在两天预报中

(参见图 3) 西风槽北段东移较快形成横槽, 副极锋锋区呈西南西-东北东走向, 冷锋前沿达 41°N , 较实况偏南且锋区偏弱。冷空气进入高原西部缓慢东移, 西太平洋副热带高压强度显然不如 NOM, 较为接近实况, 可是位置较实况偏东得多。对流层上层南亚高压中心位于 32°N 、 109°E , 与实况颇为接近。

在对流层中下层没有热低压形成, 700hPa 高原东部的一支南风气流较强; 宽约 7 个经度。相应主要雨带位于西太平洋副高的西北边缘 $34\text{--}37^{\circ}\text{N}$ 、 $105\text{--}115^{\circ}\text{E}$, 中心强度为 $31\text{mm}/\text{日}$, 显然雨带位置偏东北且强度偏弱。

2. 平滑地形 (SMO)

这是 ECMWF 在试验时段的业务地形方案^[4]。

对流层中上层的环流形势与 $3/4\text{ SM}$ 的结果基本相似, 但锋区走向比前者更近于纬向且强度稍强。 500hPa 上西太平洋副高 588 线范围也与之相似, 但高压中心位于 27°N 、 116°E , 较实况偏东南。 200hPa 南亚高压中心比实况略偏西且强度偏弱。 对流层低层开始出现热低压, 位于高原西北部, 较实况偏北。 雨带位于 $35\text{--}40^{\circ}\text{N}$ 、 $102\text{--}105^{\circ}\text{E}$, 中心强度为 $37\text{mm}/\text{日}$, 仍比实况偏北且弱。

3. 修正平滑地形 (MOD)

吴国雄、陈受钧(1984)指出: 包络地形歪曲了高原东坡, 影响了对中尺度天气系统的预报能力。 他们所计算的个例为盛夏, 低涡东北部与副高相联系的偏东风较强。 本例发生在晚夏初秋, 行星锋区已开始南移, 因而高原北界在包络方案中的扩展可能将导致预报的失真。 以 100°E 的高度剖面为例(图略), 酒泉的实际高度为 1478m , 可是在包络地形中其高度约 3900m 附近其它各站都有类似现象。 这显然使高原北侧范围扩大。 如果在这一带采用平滑地形, 而在高原范围内采用包络地形就比较接近实际地形高度。

本试验是将 $16.875\text{--}37.50^{\circ}\text{N}$ 、 $69.25\text{--}103.00^{\circ}\text{E}$ 包含高原主体的范围用包络地形表征, 然后嵌套到平滑的地形中去。 结果北支西风带的情况比较接近实况 (参见图 3)。 冷锋受阻于祁连山区以北, 呈东西走向; 对流层低层高原上热低压发展较强, 与 ENV 相近, 中心位置偏北。 高原东侧的偏南气流较强且范围较宽。 尽管最大上升气流中心位置较偏西, 但辐合比前几种情况强。 降水中心强度达 $53\text{mm}/\text{日}$, $40\text{mm}/\text{日}$ 的降水范围也较大, 只是雨强中心位置仍较实况偏西偏北。

表 1 给出上述五种地形方案数值试验结果的比较。 地形的作用可以综述如下:

(1) 随着地形的增高, 西风槽的强度发生了一系列的变化。 如以 500hPa 中的 576 等高线在各个试验中的位置来表征西风槽的情况, 从图 3 可以清楚地看出, 随着高原地形的

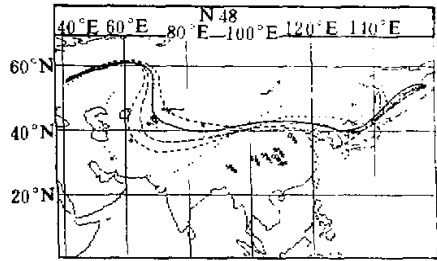


图 3 500hPa 上 576 等高线及 200hPa 南亚高压中心在各次试验中的位置(48 小时预报)

实线为 576 等高线实况; a 为 NOM 试验; b 为 $3/4\text{ SM}$ 试验; c 为 SMO 试验; d 为 MOD 试验; e 为 ENV 试验。

图例: XX ● 为各次试验中 200hPa 高压中心位置;
● XX 为各次试验中 200hPa 高压中心强度;
Y Y 为各次试验符号(同上); obs 为实况。

表 1 在不同地形方案中各系统 48 小时预报的强度及位置

48h 预报 实验	地形方案	700 hPa 高原热低 压	500hPa 西太平洋副高		200 hPa 南亚高压		高原东 北侧 强降水中心 (mm/日)
		强度 (10gpm)	强度 (10gpm)	位置	强度 (10gpm)	位置	
obs	实 况	305	588	28°N/111°E	1260	31°N/109°E	94
NOM	无地形	无	595	35°N/113°E	1269	37°N/112°E	/
3/4 SM	将 SMO 地形减 1/4 高度	无	589	30°N/118°E	1258	32°N/109°E	31
SMO	1981 年业务试验模式地形	304	588	28°N/116°E	1256	32°N/105°E	37
MOD	将高原及邻近范围的 ENV 地形嵌套在 SMO 地形上	300	586	28°N/116°E	1257	31°N/102°E	53
ENV	1983 年 4 月以后业务模式地形	300	585	22°N/116°E	1256	27°N/93°E	46

增高,高原西侧的西风槽减弱变浅;而在日本海一带的槽逐渐加深。这是大尺度地形对槽影响的结果。在 3/4SM 中,西面的槽较浅,东面的槽比 NOM 深;这种变化在 SMO 中比 3/4 SM 更为清楚。在 ENV 中西面的槽显著变浅,东面的槽明显加深,位置也比较偏西。实况的 576 线处于 ENV 与 SMO 的试验结果之间。在 MOD 中由于高原北侧地形修正的结果,576 线介于 ENV 与 SMO 之间比较接近实况。此外随着地形的增高,中亚低槽在东移的过程中,气流的爬升作用逐渐减弱,绕流作用增强;槽前锋区从东北-西南走向逐渐转为东-西走向,并逐渐受阻于高原北侧。由各试验中 95°E 剖面图(图略)可以看到,随地形高度的增高冷锋倾斜度愈加陡峭。

(2) 对流层上层南亚高压中心随着地形高度的增加而愈向高原腹地西南进,且强度逐渐减弱(图 3)。与此对应,在对流层中层 500hPa 西太平洋副热带高压愈向东南退,强度也逐渐减弱。可见西太平洋副高的位置和强度与地形的动力作用有关。在较高地形的背风坡,由于正涡度加强,副高因而也渐向东南退。

(3) 对流层低层次天气尺度系统对地形影响十分敏感。当无地形时完全不出现热低压,随着高度增高,热低压逐渐出现,强度愈深,垂直伸展愈高。在其东部的西南风与偏东风之间的横向切变也随地形的增高而愈加明显。图 4 表示了各地形试验中暖切变所在位

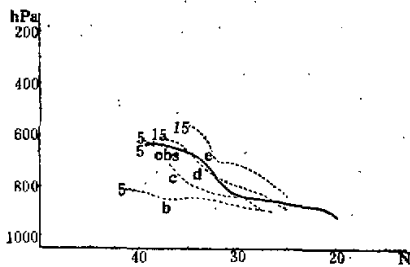


图 4 各次试验中暖切变在 105°E 的位置
(48 小时预报)

说明同图 3, 切变线左端所标数值为切变线北侧最大东风分量中心

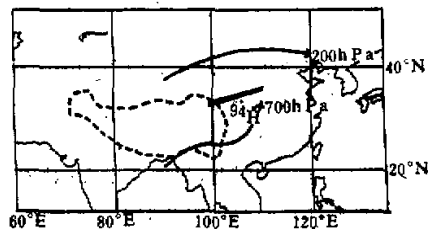


图 5 1982 年 8 月 30 日 00 时高低空急流、
切变线与降水中心位置实际配置图
H 为 200hPa 南亚高压中心位置梯形区为
700hPa 切变线位置

置,表明这种位于 500hPa 以下的系统随高度向北倾斜,而且随地形增高其位置愈向南移,

辐合强度逐渐增大, 在 3/4 SM 中切变线位置比较偏北, 且其南北的风速较弱。随着高原地形的增高, 切变线北侧的偏东风加强显著。ENV 和 MOD 中其北侧东风分量中心最大达 15 m/s, 最大上升运动正位于东南风风速最大中心附近。并且随着高原地形的增高, 总的来说降水强度也逐渐增强。

(4) 试验和分析再次证明, 强降水是高低空特定流型结合的结果。图 5 给出分析场上降水中心、高空气流 (200hPa)、低空气流 (700hPa) 及切变线 (700hPa) 的位置配置。在低层, 急流左侧正是气旋性涡度最大处; 在高层, 反气旋中心的北面及急流以南则是辐散较强的位置。故这样的高低空配置有利于低气压系统的形成和维持。上述结构在各地形试验中也基本相似(图略)。

四、讨 论

1. 地形对地面气旋发展的影响

如果没有青藏高原, 或者在数值模式中地形过低, 冷暖空气会在高原的位置上交绥。强斜压作用导致位能向动能转换, 我国西部地区也会有气旋生成。由于庞大的高原使南来的暖湿气团和北来的干冷气团绕道而去, 交绥在我国东部。我国西北地区天气系统较为单调, 多冷锋、切变及锢囚系统活动。

2. 地形对西风槽的影响

随着高原地形的增高, 冷锋锋区的位置由西南-东北走向逐渐为东-西走向, 高原西侧的西风槽减弱, 沿海一带的西风槽加深。对地形这种动力作用的模拟试验表明, 高原北侧过度平滑会扩大高原的范围, 歪曲地形的动力效应, 从而损害模式对中纬度西风带系统的预报能力。

3. 地形对高原低层次天气尺度系统的影响

次天气尺度系统对地形的影响十分敏感, 高原上热低压在不同的地形试验中有明显的变化。在热低压的东部常存在着东西向的西南与东南气流之间的暖切变, 只有在有利的高层系统的配置下, 并且多数有与北支西风带系统的结合, 才会有强降水产生。因而当高原上次天气尺度系统出现后, 要着重分析周围的环境场及其上层的系统、流场的配置。

本文在写作过程中得到陶诗言先生的指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Burridge, D. M. and J. Hasefer, 1977, A model for medium range weather forecasting, *ECMWF Tech. Rep.*, No. 4, p. 45.
- [2] Wallace, J. M., S. Tibaldi and A. J. Simmons, 1983, Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of envelope orography, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109, p. 683—718.
- [3] H. Savijärvi, 1984, The energy budgets in north America, north Atlantic and Europe based on ECMWF analyses and forecasts, *ECMWF Tech. Rep.*, No. 27.
- [4] Tibaldi, S., J. F. Geleyn, 1981, The production of a new orography, land sea mask and associated climatological surface fields for operational purposes, *ECMWF Tech. Memo.*, No. 40, p. 95.
- [5] Wu Guoxiong, Chen Shou jun, 1985, The effect of mechanical forcing on the formation of a mesoscale vortex, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 111, p. 1049—1070.