第48卷 第4期 气 象 学 报 Vol. 48, No. 4
1990年11月 ACTA METEOROLOGICA SINICA Nov., 1990

四川"81.7"特大暴雨和西南涡的数值模拟*

钱正安 顾弘道 颜 宏 陈玉春 李素华
(中国科学院兰州高原大气所)

何 军
(成都气象学院)

提 要

本文利用复杂地形条件下嵌套细网格预报模式、由欧洲中心的格点资料，设计了六组不同的模拟试验方案，对1981年7月11—15日四川大暴雨及西南涡过程进行了48小时数值模拟。结果表明，本模式较好地预报了这次大暴雨及西南涡过程。对这次西南涡及暴雨过程的发展，凝结潜热有最重要的影响，青藏高原地形的阻挡作用也有重要影响，地面感热和潜热通量、地面摩擦及边界层内的侧向摩擦对西南涡的发展、上升运动和降水的加强也有一定的贡献。

一、引 言

1981年7月11—15日，四川盆地因西南涡强烈发展造成特大暴雨，给人民生命财产带来重大损失。

这次特大暴雨过程已引起许多学者的关注。成都中心台、郭英华和程麟生等对其进行了天气动力学研究[1-2]；陈受钧、Anthes、Hovermale及周晓平等曾先后使用国内外五种模式对其进行了数值预报[3-7]，这些大大增进了人们对这次暴雨过程的认识。但目前对这次特大暴雨及西南低涡的成因和机制的研究尚少[8]。

对西南涡及其暴雨的成因，历来有不同的看法，陶诗言等强调凝结潜热的反馈作用[9]；李国庆等指出青藏高原地形的影响[10]；罗四维等曾指出边界层内的侧向摩擦的作用[11]；卢敬华则指出地面摩擦的影响[7]。为检验上述因子对这次典型西南涡暴雨发展的相对重要性。本文用复杂地形条件下嵌套细网格预报模式(下称本模式)[12]和欧洲中心(ECMWF)1981年7月的格点资料，对其进行了数值模拟研究。重点分析地面感热、潜热通量、地面摩擦和地形对它的影响。

以下简要叙述它的天气形势及降水，所用的模式，模拟试验方案，模拟结果及结论。

二、天气形势及降水

7月11日12时(世界时，下同)500hPa图上(图略)在中高纬度地区，因贝加尔湖槽

* 本文于1987年7月30日收到，1988年12月25日收到最后修改稿。

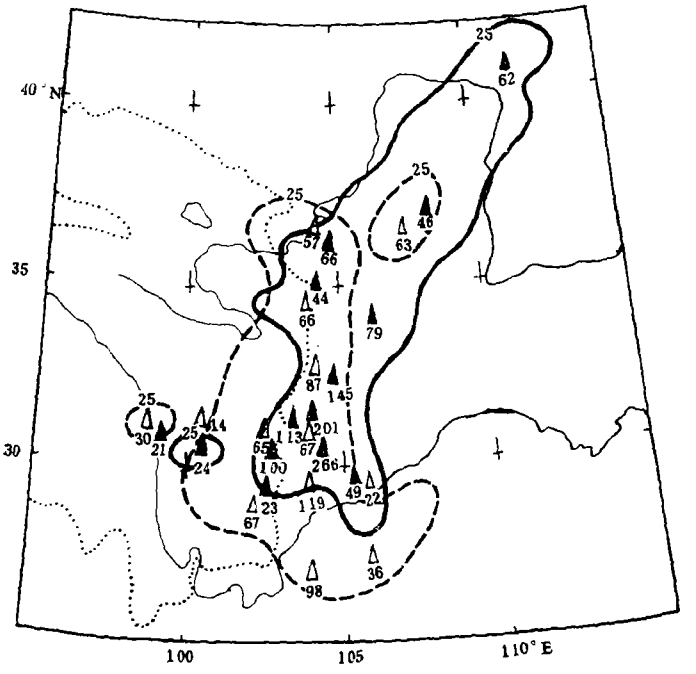


图 1 1981年7月12—13日12时(24—48小时)降水预报及实况
(实线、虚线分别是日降水量>25 mm的实况及预报的雨区,实、空三角形及其下部数字分别为实况及预报雨量中心的位置及雨量值,点线为青藏高原地形廓线)

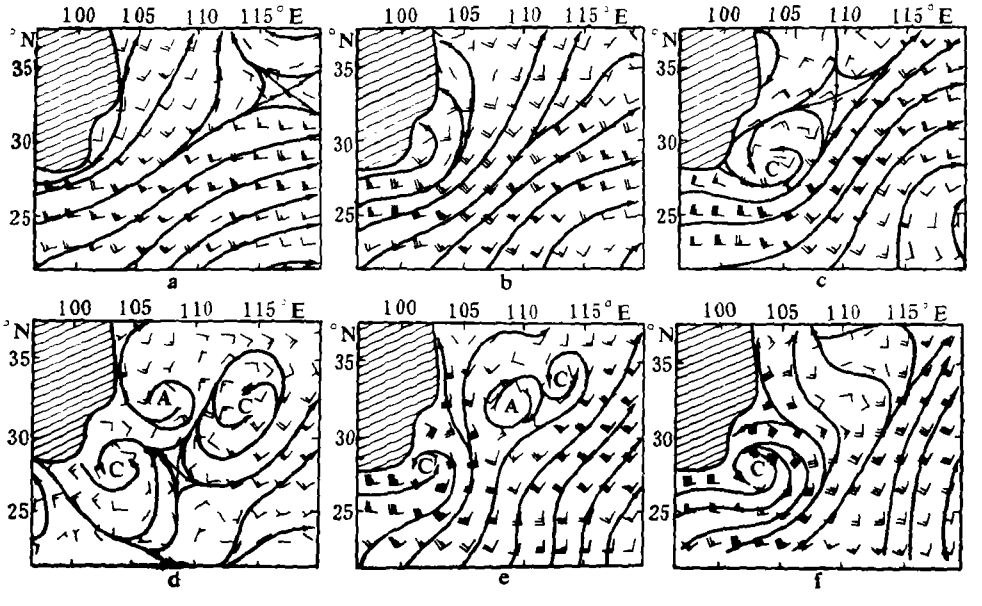


图 2 1981年7月11—13日700hPa对照试验预报及实况流场
(a,b,c分别为11—13日12时实况流场, d,e,f分别为12日00时、12日12时及13日12时的预报流场, 阴影部分为青藏高原区)

发展，在低纬度地区，由于西太平洋副热带高压西伸，印度北部又有季风低压发展，冷暖空气在四川盆地交汇，促使 12 日西南低涡产生，并出现暴雨，属典型的北槽南涡的暴雨流型。13日西南低涡发展至最盛期，此时降水亦最强。如图 1 所示，日降水量大于 25mm 的雨区从四川盆地向东北延伸至河套地区，雨量中心在四川资阳附近，日降雨量达 266mm。

三、预报模式及模拟方案

本模式系 C 型跳点网格的 $p-\sigma$ 混合坐标 6 层原始方程格点模式，水平分辨率取为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$。考虑了较真实的地形，最高达 5200 m，在陡地形处气压梯度力的计算及水平扩散项等的计算处理方面，采用了当前较新技术[12]。

模式包括了动量、热量及水汽的水平及垂直涡动交换、大尺度凝结、积云对流及辐射等较齐全的物理过程[12]。个例及批量预报试验表明，本模式能较好地反映地形的动力影响，对暴雨有较好的预报能力[13-14]。本文设计了下列六组试验。

对照试验(试验 I)：本试验中包括了可能对西南涡发展有作用的所有前述因子，即全部模式物理过程。以检验本模式对这次西南涡暴雨的预报能力。

无地面通量试验(试验 II)：这是在模式中不考虑地面感热及蒸发潜热对气温、地温及气柱中水汽净辐合量的影响，其余处理同试验 I。试验 I 和 II 比较，将显示西南涡及暴雨对去掉地面感热和潜热通量的敏感性。

无地面摩擦试验(试验 III)：这是从试验 II 中再去掉动量方程右端地面动量通量的作用，以显示地面摩擦对西南涡发展的影响。

无侧向摩擦试验(试验 IV)：这是在试验 III 中进而再去掉动量方程右端等厚边界层内的水平扩散作用，基于计算稳定性的考虑，在试验 III 及 IV 中，仍保留模式自由大气层内动量的垂直交换及水平扩散作用，比较试验 III 及 IV，将显示西南涡对边界层侧向摩擦的敏感性。要注意的是，在试验 III 及 IV 中，实际上也无地面感热及潜热通量，所以无地面摩擦及无侧向摩擦试验仅是其略称。

半地形高度试验(试验 V)：本试验将计算区内的地形高度一律减半处理，其余物理过程同试验 I。本试验主要显示青藏高原地形障碍的影响。自然这时的初始场需按减半了的地形高度重作初始化处理，以保证初始场的内部协调性。

被动潜热试验(试验 VI)：这时模式大气中虽也考虑水汽，但不考虑潜热加热的反馈作用，视潜热为被动的。这有别于完全不计水汽效应的干模式，其余皆同对照试验。比较试验 I 和 VI，将显示潜热的影响。

表 1 是上列六组试验方案的总结。

本模式中的四阶水平扩散系数 K_H 为 4×10^{15} m^4/s，各预报量 (U,V,Q) 的垂直交换系数 K_z 与它们的垂直梯度有关，对 T 还与气柱稳定度等有关，即 K_H 和 K_z 均因预报量而异。对大尺度降水过程中的饱和凝结百分比判据，在 25°N 以北及以南分别取为 85 % 及90%。在上列六组试验中，以上参数等均沿用原值，未予变动。

我们按整层无辐散初始化方案，选 7 月 11 日 12 时作初始场，对上述各试验均积分48

表 1 模拟试验方案总结

试验名称	试验序号	凝结潜热	地面感热潜热通量	地面摩擦	边界层侧向摩擦	地形高度
对照	试验 I	有	有	有	有	Zs
无地面通量	试验II	有	无	有	有	同 上
无地面摩擦	试验III	有	无	无	有	同 上
无侧向摩擦	试验IV	有	无	无	无	同 上
半地形高度	试验V	有	有	有	有	$0.5\times Zs$
被动潜热	试验VI	无	有	有	有	同 上

小时。

四、试验结果分析

限于篇幅，以下着重分析各试验中西南涡及暴雨预报和模拟的结果。主要分析 700 hPa。

1. 对照试验

图 2 是 1981 年 7 月 11—13 日期间对照试验预报及欧洲中心的实况 700 hPa 流场。初始场上，四川盆地西部仅有弱气旋性弯曲，西南风速在 10 m/s 以下(图 2 a)。预报 12

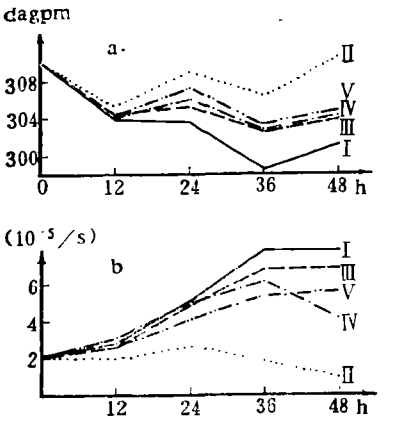


图 3 各试验预报及模拟的 700 hPa 西南涡中心处平均高度(a)及涡度(b)随时间变化曲线[1)]

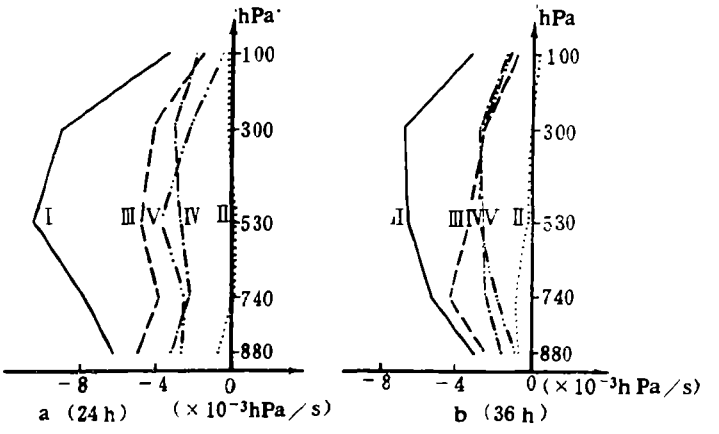


图 4 各试验预报及模拟的西南涡中心平均垂直运动(ω)垂直廓线

小时后，在 28°N，103°E 附近出现一清晰的闭合环流(图 2 d)，此即后来造成特大暴雨的西南涡。虽无同时刻的实况相比，但从当时已出现暴雨的实况看，低涡确已形成。即本模式预报了西南涡的产生。预报 24 小时后，该涡位置少动，涡区及以南地区有 18 m/s 的低空急流发展，气旋性环流显著加强(图 2 e)，涡区平均涡度值(涡中心四格点的平均值，下同)达 5.1×10^{-5}/s(图 3 b)，上升运动强烈发展，530 hPa层附近的平均上升速度达10.5×10^{-3}hPa/s，比一般值大一个量级，比它最盛期还强(图 4)。这时涡已伸展到 500 hPa 层上，同时，在该涡的西北侧(32°N，99°E 附近)，本模式还预报了郭英华等提及的东移的高

1) 图3、图4a、图5、图7中的II为VI，III为II，IV为III，V为IV；图4b中的II为VI，III为II，V为III。

原涡(图略)[2]。

此后，低空急流强达 19 m/s，又由于上述东移高原涡与西南涡的叠加，西南涡发展达最盛期(图 2 f)。平均涡度达最大值 7.8×10^{-5}/s (图 3 b)，深厚的正涡度层伸展到 420hPa 附近(图 5)，与实况相当接近。

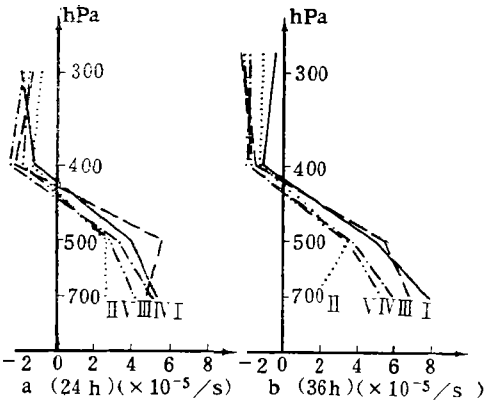


图 5　各试验预报及模拟的西南涡中心平均涡度垂直廓线

图 1 是这次暴雨最强时段(后 24 小时)的预报及实况雨量。如图所示，日降水量≥25 mm 的预报及实况雨区，两者相当接近，因格点模式，预报的雨区稍落后些。预报的暴雨中心在四川乐山附近，达 119 mm，实况在资阳附近(日降水量 266 mm)，两者才相距 100 多公里，还可见到，雨区中其他暴雨中心也对应较好。优于其他模式的降水预报[3-7]。因而本模式可作下列敏感性试验研究。

2．地面感热和潜热通量的影响

如不考虑地面感热和潜热通量，模式积分 12 小时后，西南涡也出现，随后西南涡及低空急流也迅速发展(图 6 a)，西南涡区平均涡度及位势高度的变化曲线与试验 I 最接近，仅强度稍弱些(图 3)。

值得注意的是，去掉地面感热及潜热通量后，西南涡上空 500 hPa 的涡度比试验 I 加强了(图 5)。

但在该试验中 500 hPa 高原涡却一直未出现，似乎与西南涡相比，高原涡的发展更依赖于地面感热的作用。与我们过去的结论一致[15]。

在试验 I 中，西南涡区的瞬时面积平均地面感热加热率达 5×10^{-3}℃/s 左右。因局地垂直上升运动是与非绝热加热率的拉普拉斯成正比的，所以无地面通量试验中，涡区低层大气冷却，空气层结更为稳定，垂直涡动交换减弱，上升运动较试验 I 明显减小(图 4)。同时因无地面蒸发水汽的补充、气柱中的水汽净辐合量减小，西南涡区降水也明显减弱，特别是预报时段后期，涡区平均降水量约减小了一半(图 7)，涡区最强日降水中心仅 73 mm。

可见地面感热及潜热通量虽对西南涡的发展有一定促进作用，但不很敏感，可对加大降水量有重要作用。Joseph 在极涡降水数值模拟中也得到类似结论[16]。

3．地面摩擦及边界层侧向摩擦的影响

在无地面摩擦试验中，也早在积分 12 小时时西南涡就清楚地模拟出来了，积分初期低涡强度很接近于试验 II(图 3)，以后西南涡也继续发展，但因不计边界层内的摩擦作用，地面附近穿越等压线向内辐合的空气及水汽质量减少，致使低涡的强度，垂直运动及降水等都比试验 II 中弱(图 3，6 c，7)。即地面摩擦对西南涡的发展有一定贡献。看来，地面摩擦不只是消耗因子，就象在 CISK 反馈理论中一样，通过埃克曼抽吸和积云对流，它可成为西南涡能量的制造机制之一。不同于郭英华地面摩擦是西南涡发展能量汇的结论[8]。这可能与该两模式中不同的地面动量通量处理等有关。在郭文中用

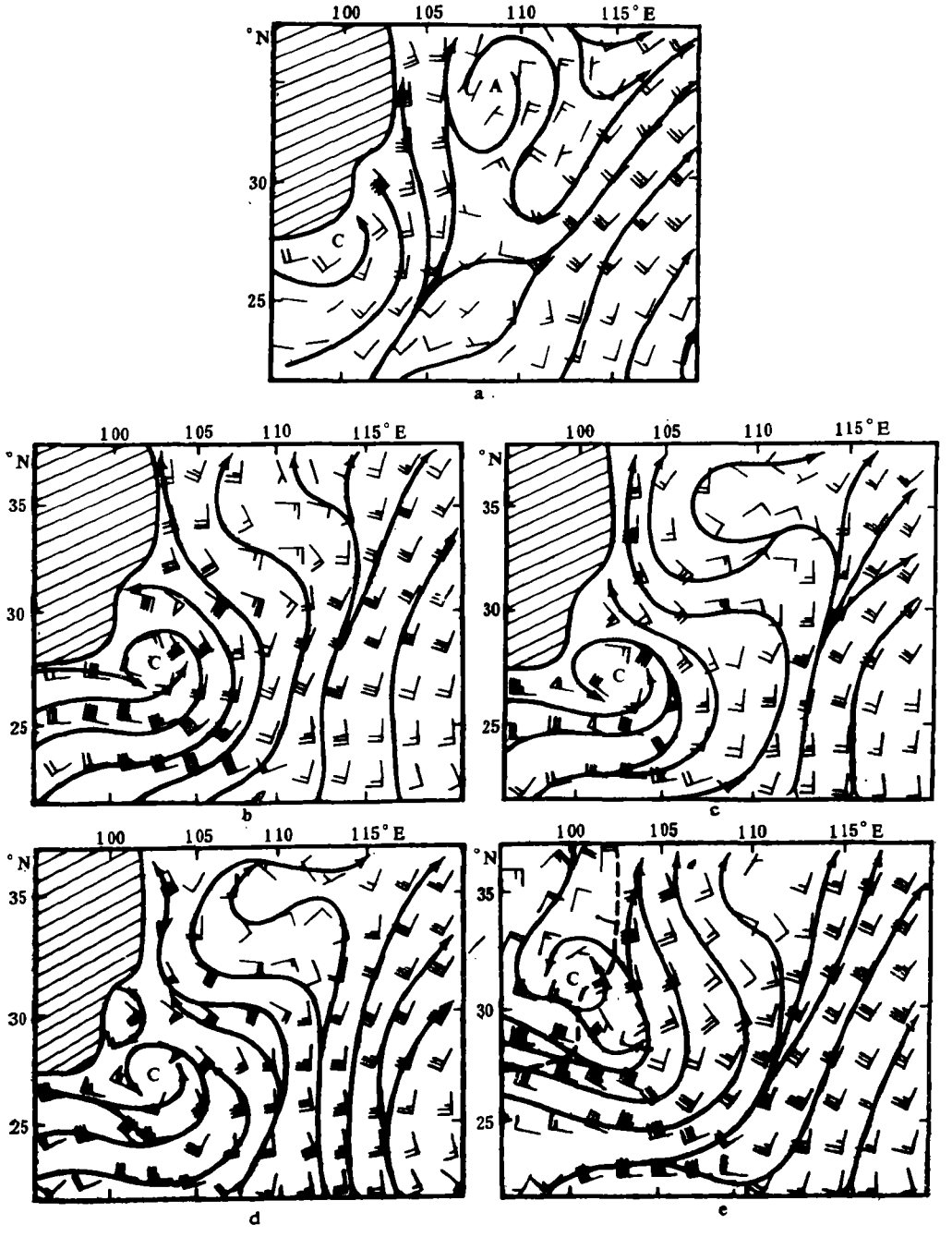


图 6 各敏感性试验 48 小时时模拟的 700 hPa流场
(b-e,a 分别对应试验II-VI 的流场，其余说明同图 1)

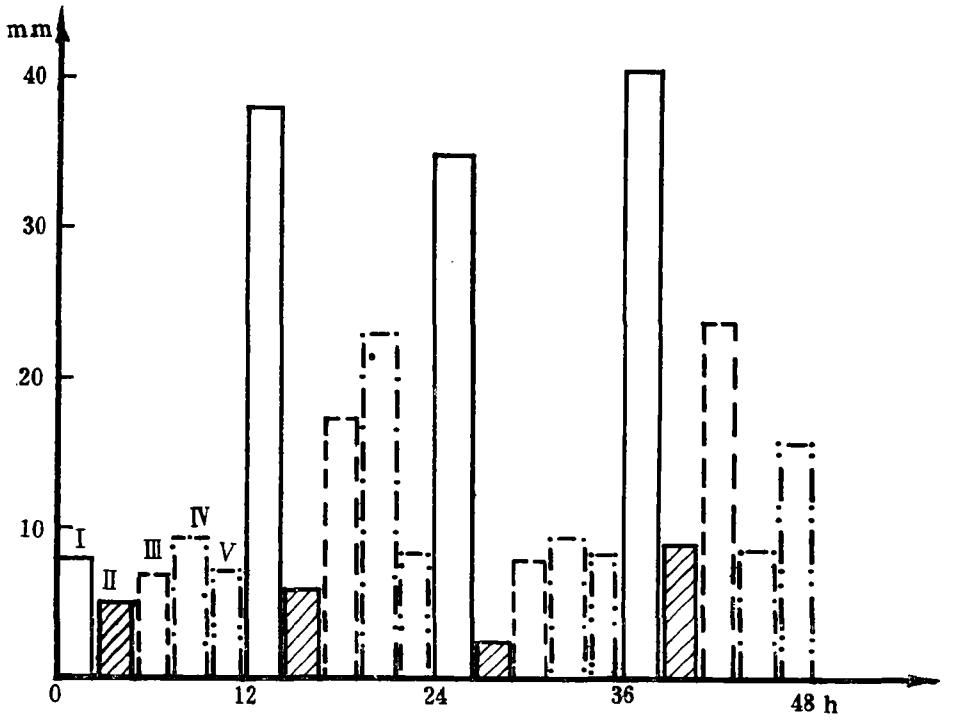


图 7　各试验涡中心附近每 12 小时平均降水量直方图

了 Deardorff(1972)方案，考虑了气柱稳定度的影响[17]；而本模式中仅是常用的阻尼定律方案[12]。

如在试验 III 中进而再去掉边界层内侧向摩擦的作用，西南涡亦形成并发展，只是其发展又比试验 III 中弱些(图 3，6 d)。这说明边界层的侧向摩擦对西南涡的发展也有正贡献。

还要指出的是，与试验 III 中一样，因无地面阻滞及边界层内侧向阻曳作用，本试验中 700 hPa 急流强度比试验 I 中更强，特别在高原侧向边界层附近(图 2 f，6 d)。

4．地形高度的影响

在半地形高度试验中，青藏高原"被压低"至 700 hPa 面以下。这时模拟的大尺度背景场发生了较大变化。贝加尔湖低压加强并南移，贝加尔湖槽后西北气流从更西位置(100°E 附近)南下，在高原东部及四川盆地有一南伸的槽区，并有低涡环流(图 6 e)。该涡虽位于"被压低"了地形的背风坡侧，但完全在西北气流上发展，位置也比前述各试验明显偏西偏北，与常在西南季风气流上发展的西南涡已大相径庭了。这时云贵川地区的西南低空急流也未能发展。与陈受钧的结果一致[3]，地形高度减半以后，也失去了许多天气扰动的细节。

因地形高度"被压低"，虚假地延长了地形面以上的气柱，一般使高原及其附近地区的降水虚假地加大了。这说明青藏高原地形障碍的阻挡作用对西南涡及西南低空急流的发展影响相当大。

5．潜热的影响

在被动潜热试验中，12 小时后西南涡虽也模拟出来了，但此后低涡一直在填塞中（图 3），24 小时后低涡环流消失（图 6 a）。去掉潜热反馈作用后，与其他试验相比，模拟的西南涡强度最弱、降水量最小，与对照试验有最大的偏离，特别是在最强降水时段。这启示潜热反馈作用的存在，即西南涡及其暴雨的发展对潜热效应最敏感，这些陈受钧及郭英华已有讨论[3,8]，赘不多述。这说明 CISK 机制是西南涡发展加强的重要机制之一。也证实了陶诗言等的结论[9]。

五、结论和讨论

1．本模式较好地模拟了西南涡发展演变的过程，结构和暴雨天气。值得指出的是，本文中的模式分辨率及欧洲中心格点资料都还较粗。若适当加密青藏高原及其附近地区的初始场，再用较细网格的嵌套模式的话，可能会使西南涡及青藏高原上的系统的模拟更好些。

2．各因子的敏感性试验表明，凝结潜热对本次西南涡暴雨过程有最重要的影响。特别是在低涡发展阶段。若去掉潜热的反馈作用，西南涡强度将明显减弱，低空急流不能发展，降水将大幅度减小。青藏高原地形的阻挡作用对西南涡的发展也有重要作用。在较真实地形高度时西南涡常在四川盆地西部形成发展；在降低高原地形高度后，高原附近的环流改变很大，西南涡没有形成。地面感热及潜热通量，地面摩擦和边界层内的侧向摩擦对西南涡的发展和降水也有一定贡献，如去掉上述因子之一，一般将使西南涡强度减弱，降水减小。

但在涡形成阶段，上述各因子的影响似无明显差别。

3．本文对环境流场，水汽条件等影响因子，还未予考虑。文内地形影响的处理还不很合适。一方面地面通量、地面摩擦及边界层内侧向摩擦等下垫面因素本身也体现了部分地形影响，所以地形的影响似乎还要大些；另一方面，本例中降水特别大，所以潜热影响更显得突出。对其他个例，上述各因子的相对重要性可能会有差别。因此更多个例的试验是必要的。

参 考 文 献

[1] 成都中心台，1981 年 7 月特大暴雨的研究，四川盆地大暴雨文集，12—37，1982。

[2] Kuo, Y. H., L. Chen and R. A. Anthes, Mesoscale analyses of Sichuan flood catastrophe, 11—15 July 1981, *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1—19, 1986.

[3] Chen, S. J., and L. Dellosso, Numerical prediction of the heavy rainfall vortex over the eastern Asia monsoon region, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 730—747, 1984.

[4] Anthes, R. A. et al., A comparative numerical simulation of the Sichuan flooding catastrophe(11—15 July 1981), Proceedings of the first Sino-American workshop on mountain meteorology, 519—524, Hong Kong, 1983.

[5] Hovermale, J. B., Numerical experiments with the Sichuan flooding catastrophe(11—15 July 1981), vide supra, 243—254.

[6] Zhou, X., and X. Hu, A brief analysis and numerical simulation of the Sichuan extraordinarily heavy rainfall event in 1981, vide supra, 555—566.

[7] 卢敬华，西南低涡概论，气象出版社，64—65，1986.
[8] Kuo, Y. H., Numerical simulation of the Sichuan flood catastrophe: 11—15 July 1981, manuscript.
[9] 陶诗言，等，中国暴雨，139—144，科学出版社，1980。
[10] 李国庆等，青藏高原东南部低涡的初步模拟试验，中国科学，(3)，286—294，科学出版社，1976。
[11] 罗四维等，夏半年青藏高原 500 hPa 低涡切变线的研究，102—127，科学出版社，1979。
[12] 颜宏等，复杂地形条件下嵌套网格模式的设计（一）及（二），高原气象（增刊），6，1—138，1987。
[13] 李素华等，三个个例的数值预报结果分析，高原气象（增刊），6，300—315，1987。
[14] 钱正安等，35例数值预报试验的总结，高原气象，待发表。
[15] 钱正安等，1979 年夏季青藏高原低涡的统计及低涡产生的气候因子探讨，青藏高原气象科学实验文集（二），182—194，科学出版社，1984。
[16] Joseph, M. S., et al., A numerical study of the development mechanisms of polar lows, *Tellus*, 37 a, Polar low special issue, 460—477, 1985.
[17] Deardorff, J. W., Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 91—115, 1972.

NUMERICAL SIMULATIONS OF EXTREMELY INTENSE RAINSTORM AND SOUTHWEST VORTEX OVER SICHUAN IN JULY OF 1981

Qian Zhengan　Gu Hongdao　Yan Hong
Chen Yuchun　Li Suhua
(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica)

He Jun
(Chengdu Institute of Meteorology)

Abstract

In this paper using a nested fine mesh model over complex topograph and the ECMWF 's grided point data of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ in July of 1981, the six sets of numerical experiment schemes of with and without types were designed and their 48-hour numerical simulations of the extremely intense rainstorm and southwest vortex in July of 1981 were run.

The results of numerical simulations show that the model has a quite good performace for forecasting of heavy rain and southwest vortex. In the developing of the heavy rainstorm and southwest vortex in July of 1981, the release of latent heat of precipitation plays the most important rule, the effect of barrier of Tibetan Plateau has an important rule, and the fluxes of surface sensible and latent heat, surface friction and lateral friction in boundary layer have a certain contributions to the development of southwest vortex, intensifing of upward motion, and the heavy rainfall as well.