

# 地形对昆明准静止锋影响的数值模拟研究

王 曼<sup>1,3,4</sup> 段 旭<sup>1,3</sup> 李华宏<sup>2,3</sup> 符 睿<sup>1,3</sup>

(1. 云南省气象科学研究所, 昆明 650034; 2. 云南省气象台;  
3. 季风与气象灾害研究开放实验室; 4. 中国气象局成都高原气象研究所)

**提 要:** 利用 2008 年 1 月 NCEP/NCAR 全球  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料和 MM5 中尺度数值模拟结果, 分析研究了昆明准静止锋的结构和位置。结果表明: 在中国南方地区持续、频繁受冷空气影响下, 昆明准静止锋的形成和维持是高原地形的阻挡和特定天气系统配置共同作用的结果; 通过对地形减半的敏感性数值试验, 定量分析得到高原地形阻挡作用是昆明准静止锋形成和维持的必要条件。

**关键词:** 昆明准静止锋 云贵高原 数值模拟 地形作用

## A Numerical Study of the Effect of Terrain on Kunming Quasi-Stationary Front (KQSF)

Wang Man<sup>1,3,4</sup> Duan Xu<sup>1,3</sup> Li Huahong<sup>2,3</sup> Fu Rui<sup>1,3</sup>

(1. Yunnan Institute of Meteorology, Kunming 650034; 2. Meteorological Observatory of Yunnan Province;  
3. Monsoon & Meteorological Disaster Study Lab;  
4. Chengdu Insitute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration)

**Abstract:** The numerical simulation using the NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  global reanalysis in January 2008 and the MM5 mesoscale model is performed to investigate the structure and characteristics of Kunming quasi-stationary front (KQSF) during the extreme low temperature and frozen snow events over southern China. The results indicate that the formation and its maintenance of KQSF are the consequence of the obstruction due to plateau terrain and special synoptic system configuration under the influence of the long-time, repeating cold airs over southern China. It is found that the obstruction of plateau terrain is necessary for the formation and the maintenance of KQSF by the sensitivity numerical experiments of halving terrain.

**Key Words:** Kunming quasi-stationary front(KQSF) the Yunnan-Guizhou Plateau numerical simulation terrain effect

云南省科技攻关及高新技术计划(2006SG25)、成都高原所开放基金“地形对昆明准静止锋作用的数值模拟”和“西南地区 2008 年低温、雨雪、霜冻天气灾害研究”课题共同资助

收稿日期: 2008 年 3 月 19 日; 修定稿日期: 2009 年 7 月 3 日

## 引 言

2008年1月10日至2月初,中国南方地区出现了罕见的持续低温冰雪灾害,云贵高原东部的贵州气温异常偏低,而西部的云南除与贵州毗邻的昭通、曲靖东部外,其余大部分地区气温异常偏高。在异常的气候背景下,导致云贵地区天气差异如此之大的原因是昆明准静止锋<sup>[1]</sup>的存在且长时间维持。昆明准静止锋是地面冷高压沿青藏高原东侧运动遇高原阻挡而形成的,锋面位于高原东侧与冷高压西侧区域的云贵之间,呈准南北向<sup>[2]</sup>。如果地面冷高压势力较强,准静止锋演变为冷锋向西推进,影响云南哀牢山以东大片地区;若地面冷高压势力较弱,准静止锋则有可能演变为暖锋而东退。有关昆明准静止锋的研究,段旭等<sup>[2]</sup>利用10个典型个例进行合成分析,给出了其温湿特征和风场结构;李英等<sup>[3-4]</sup>对其造成的寒潮、风雹的天气过程进行了诊断分析;尤红等<sup>[5]</sup>对其造成云南强倒春寒天气进行了分析;杜正静等<sup>[6]</sup>对2001年1月滇黔准静止锋的演变进行结构和大气环流特征进行分析,归纳了4种类型滇黔准静止锋的结构、天气和大气环流特征。上述研究给出了昆明准静止锋的结构特征,但对准静止锋维持的地形作用的定量分析尚缺。利用数值模式对地形作用进行敏感试验是较常用的定量分析手段<sup>[7-10]</sup>。作者通过分析2008年1月中国南方地区受到的持续强冷空气过程,利用数值模式模拟其结构特征和冷暖气团及地形的作用。

## 1 资料和方法

利用NCEP/NCAR全球 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ,每天4个时次的再分析资料作为天气实况。利用PSU/NCAR的中尺度模式MM5进行数值

模拟。模式区域选择三重嵌套,水平分辨率分别为90km、30km、10km,垂直方向为23层,积分中心为 $26^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\text{E}$ 。地形方案分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、 $30'\times 30'$ 、 $5'\times 5'$ ,PBL为高分辨率MRF方案,侧边界为松弛、流入一流出方案。初始场和边界场为T213数值预报场。模式模拟的起始时间为2008年1月31日08时(北京时,下同),积分48小时,取第二重区域模拟结果进行分析讨论。

## 2 天气背景

2008年1月中旬至2月初中国南方地区出现了由4次天气过程造成的连续低温冰雪灾害,时段分别为1月10—16日、18—22日、25—29日、1月31日至2月2日。在长达20多天的低温冷害过程中,昆明准静止锋一直在云贵之间东西摆动,始终没有减弱东退或增强西进。图1给出了昆明( $25^{\circ}\text{N}$ 、 $102.7^{\circ}\text{E}$ )、会泽( $26.4^{\circ}\text{N}$ 、 $103.3^{\circ}\text{E}$ )和贵阳( $26.3^{\circ}\text{N}$ 、 $106.7^{\circ}\text{E}$ )在整个过程中的日最高气温的变化,它们分别代表锋前、锋面附近以及锋后的天气演变,由图1可知:自1月11日冷空气影响贵阳降温后,处于锋后的贵阳最高气温长时间维持在一个较低的状况,表明冷空气较强且长时间滞留;处于锋前的昆明最高气温却稳定维持在一个较高的状况,说明冷空气没有影响昆明及以西地区;而会泽最高气温的变化则呈现出较大的起伏,表明准静止锋东西摆动的位置。

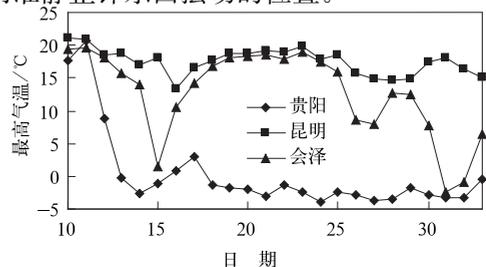


图1 2008年1月10日至2月2日昆明、会泽和贵阳最高温度演变(单位:°C)

2008年1月中旬至2月初中国南方地区出现了4次天气过程,第4次天气过程冷空气最强,影响范围最广。因此选取该过程对昆明准静止锋形成的环流形势进行分析。从2008年1月31日08时500hPa高度场(图2)可以看出,北半球亚欧中高纬度乌拉尔山地区阻塞高压较强,有利于脊前西北气流不断引导北方冷空气经西伯利亚南下,东亚槽偏东偏北且巴

尔喀什湖至贝加尔湖一带以纬向环流波动为主,易引导冷空气偏东移动。与此同时,西太平洋副热带高压和高原南支西风槽较强,阻挡了地面冷高压的南下,使冷暖气团势力相当,在滇黔之间形成准静止锋。因此,除了高原地形阻挡因素外,乌山阻高、东亚槽、副高、南支槽等环流系统的特定配置是昆明准静止锋形成和维持的另一条件。

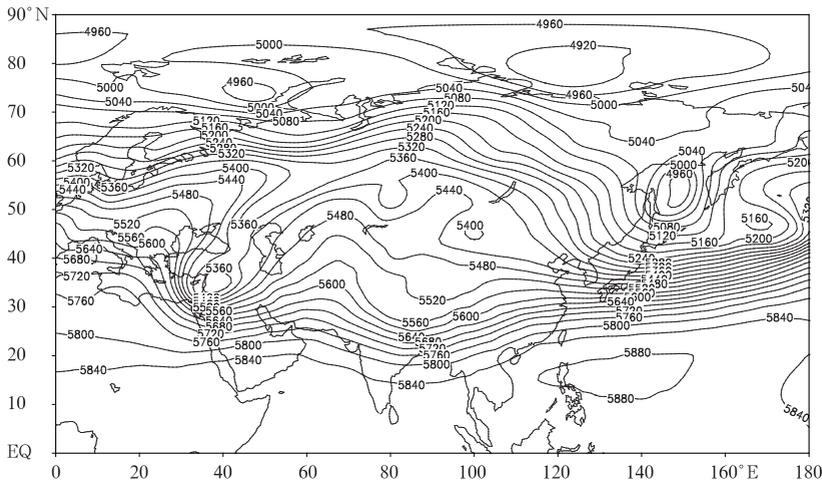


图2 2008年1月31日08时500hPa高度场

### 3 数值模拟分析

前面分析了昆明准静止锋形成和维持的两个主要因素,一是高原地形阻挡,二是副热带高压和南支西风槽等天气系统配置的影响。选取4次过程中冷空气最强的一次(1月31日至2月2日,下称1月31日过程)过程进行数值模拟,分析昆明准静止锋的位置和结构以及改变地形高度的敏感试验。

#### 3.1 数值模拟结果检验

为了检验模式模拟的能力,把NCEP/NCAR再分析资料作为实况。把模拟的结果与该资料进行对比。图3给出了NCEP/

NCAR全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料2008年2月1日02时的 $v$ 风和相当位温沿 $26^{\circ}\text{N}$ 的垂直剖面图。比较模拟的风场(图5b)和相当位温(图6b)与实况的锋区位置和垂直结构比较接近,只是在量值和锋面发展的高度上有所差别。这可能是模式模拟存在一定误差和两种资料地形数据及分辨率不同造成的差异。但从模式模拟锋区结构表现上看,MM5模式能较真实再现昆明准静止锋的移动和结构特征。

#### 3.2 1月31日过程数值模拟

自1月30日开始冷空气加强后昆明准静止锋向西推进,会泽站最高气温31日下降了 $10.3^{\circ}\text{C}$ (图1)。图4给出了冷空气加强过

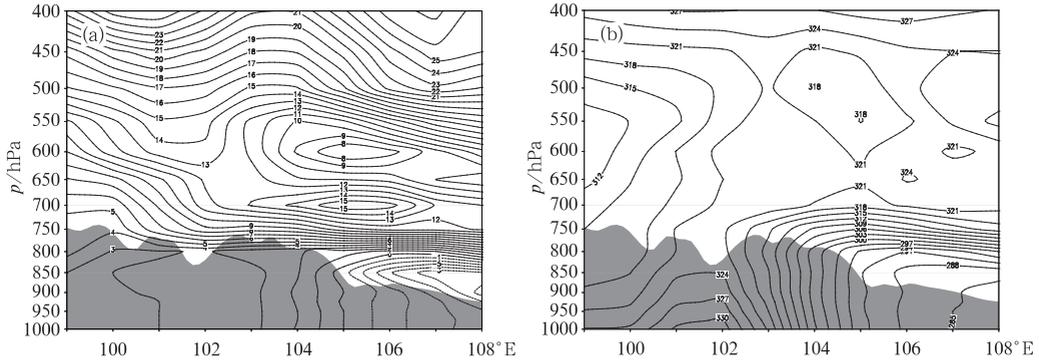


图 3 2008 年 2 月 1 日 02 时 NCEP/NCAR 再分析资料沿  $26^{\circ}\text{N}$  剖面垂直分布  
(a)  $v$  分量 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 相当位温 (单位:  $\text{K}$ )

程中温度模拟(积分初始时间为 31 日 08 时)沿  $26^{\circ}\text{N}$  剖面垂直分布,积分 6h(图 4a)低层锋区位于  $103.8^{\circ}\text{E}$  附近,该区域 650hPa 以下温度垂直梯度较小并向西略倾斜,说明大气对流层低层冷暖气团势力相当,冷气团略强。积分 12h(图 4b)低层锋区位于  $103.5^{\circ}\text{E}$  附

近,锋区位置虽然变化不大,但西侧  $101^{\circ}\sim 103^{\circ}\text{E}$  范围内的暖气团减弱,由积分 6h 的暖气团中心值  $12^{\circ}\text{C}$  减小到  $10^{\circ}\text{C}$ ,锋区东侧  $104^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$  范围内冷气团  $-4^{\circ}\text{C}$  控制的区域扩大,表明冷气团势力增强,暖气团势力减弱。积分 18h(图 4c)低层锋区西进到  $102.8^{\circ}\text{E}$  附

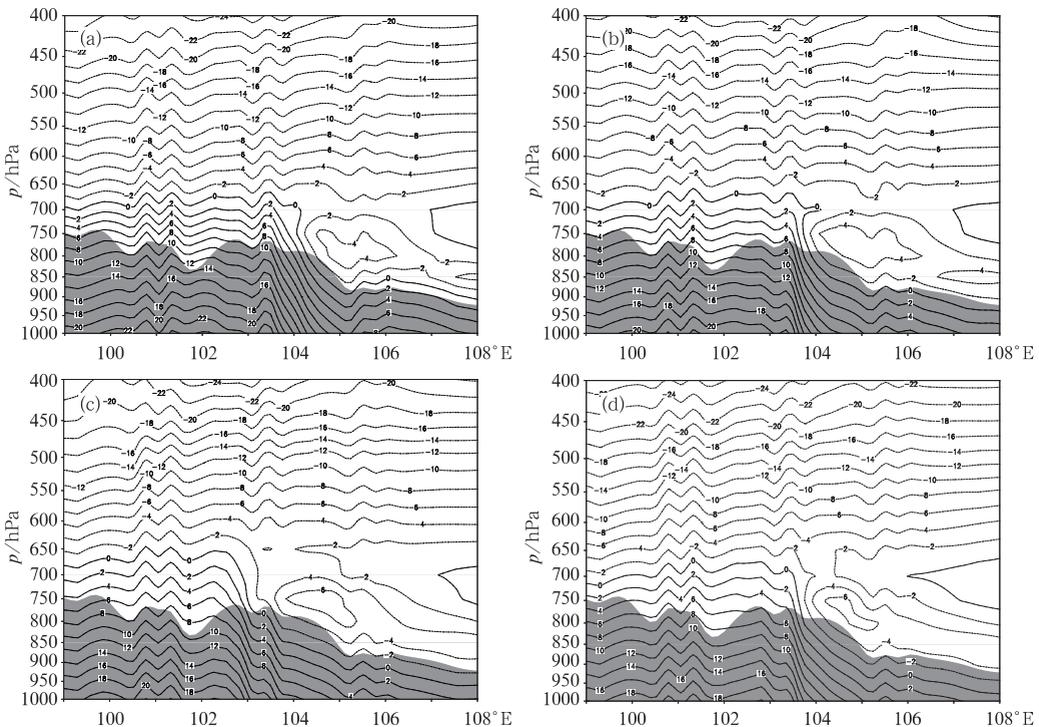


图 4 温度数值模拟沿  $26^{\circ}\text{N}$  剖面垂直分布(初始时刻:2008 年 1 月 31 日 08 时)  
(a) 积分 6h; (b) 积分 12h; (c) 积分 18h; (d) 积分 24h (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

近,锋区东西两侧冷气团强度增强、暖气团减弱,中心值分别为 $-6^{\circ}\text{C}$ 和 $8^{\circ}\text{C}$ 。积分 24h(图 4d),锋区东退至  $103.5^{\circ}\text{E}$  附近,这时锋区东西两侧冷暖气团强度与积分 18h 时并无太大变化,而锋区却东退,说明地形对冷空气的阻挡作用非常显著。

除了地形的作用外,西南气流强盛也减弱了低层冷空气的势力。图 5a 中虽然锋后低层偏东气流西扩到  $102.6^{\circ}\text{E}$  附近,但锋后从低层到高层偏西气流强盛,特别是在  $550\sim 750\text{hPa}$ 、 $100^{\circ}\sim 101^{\circ}\text{E}$  范围内  $u$  分量出现

了“V”形状,表明了大气中高层强盛西风气流向低层传送,有力地阻挡了冷气团势力继续向西扩张。同时, $v$  分量(图 5b)分布显示,偏北气流仅存在于  $800\text{hPa}$  以下、 $105^{\circ}\text{E}$  以东地区,表明冷空气的补充较弱,而在大范围区域内大气对流层中低层为很强的偏南气流,说明西风带南支槽和副热带高压都很强。结合  $u$ 、 $v$  分量分析,可知南支槽前西南气流和副高西侧偏南气流对锋前低层暖气团的维持起重要作用。

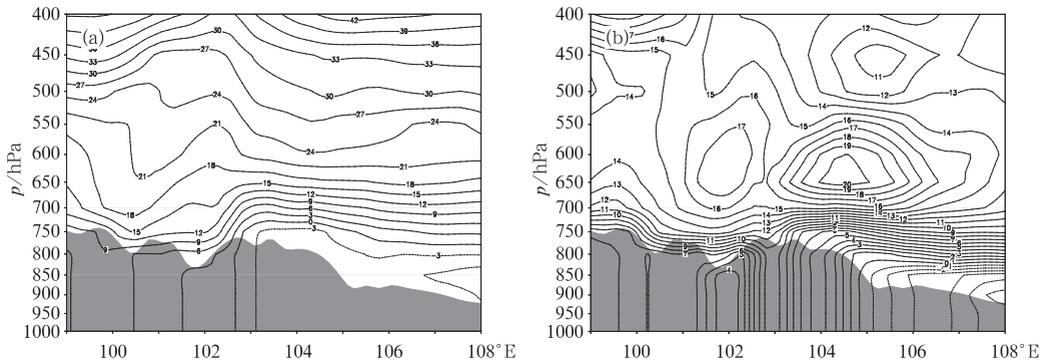


图 5 风场数值模拟沿  $26^{\circ}\text{N}$  剖面垂直分布(初始时刻:2008 年 1 月 31 日 08 时)  
(a)  $u$  分量积分 18h; (b)  $v$  分量积分 18h (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

昆明准静止锋是低层冷暖气团势力相当、相持的具体体现,锋面东西两侧气团具有不同的性质,图 4 已给出了两种气团的温度差异。从相对湿度场(图 6a)分布看,温度锋

区密集的位置湿度锋区并不存在,锋前锋后  $550\text{hPa}$  以下均为相对湿度  $90\%$  以上的高湿区,与文献[2]给出的结构特征明显不同,主要原因是本次过程中西南水汽输送较好,使

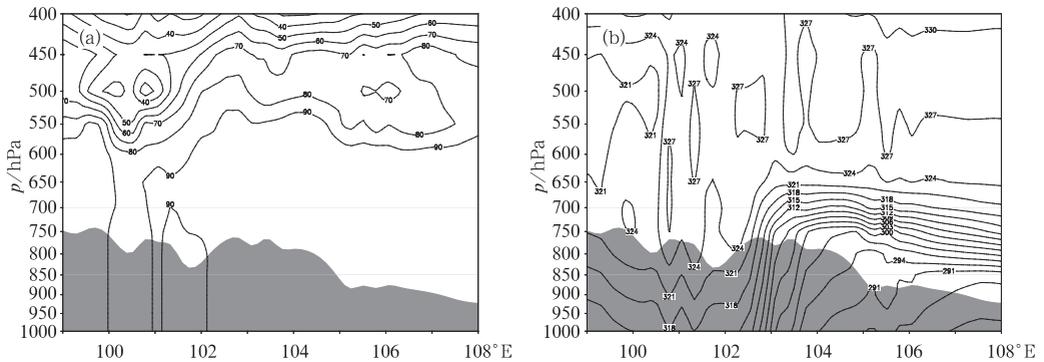


图 6 温湿场数值模拟沿  $26^{\circ}\text{N}$  剖面垂直分布(初始时刻:2008 年 1 月 31 日 08 时)  
(a) 相对湿度积分 18h; (b) 相当位温积分 18h, (单位: $\text{K}$ )

锋前的暖干气团变为暖湿气团,导致冷暖气团湿度差异较小。尽管如此,表征气团温湿特性的物理量  $\theta_e$  的分布(图 6b)还是体现了冷暖气团的不同性质,准静止锋附近区域等相当位温线密集而陡峭,说明锋区两侧气团的性质差异明显。

### 3.3 高原地形阻挡作用模拟

通过对 1 月 31 日过程中昆明准静止锋结构特征和移动模拟结果的分析,冷空气作为低层浅薄系统在西向移动中,地形阻挡作用十分明显。为了分析高原地形在昆明准静止锋形成中的作用,将模式中地形高度作减半处理,其他模式参数不变,再对 1 月 31 日

过程进行数值模拟。分析半地形下沿  $26^\circ\text{N}$  积分 18h 的剖面垂直气象要素,可以看到大气层特征的变化,低层等温度  $0^\circ\text{C}$  线西伸到  $102.5^\circ\text{E}$  以西(图 7a),锋区消失,云贵高原基本上为冷气团控制;相当位温线密集而陡峭的表征也消失(图 7b),密集等值线呈水平分布,说明水平方向气团性质相同,性质不同仅存在于高层;风场  $u$ 、 $v$  分量显示(图 7c、d),云贵高原上低层为一致的偏东气流。高原西部也出现偏北气流,不仅说明冷气团势力强大,而且偏北气流的出现标志着地形降低后,冷空气路径的改变。由原来的偏东路径改变为东北路径。

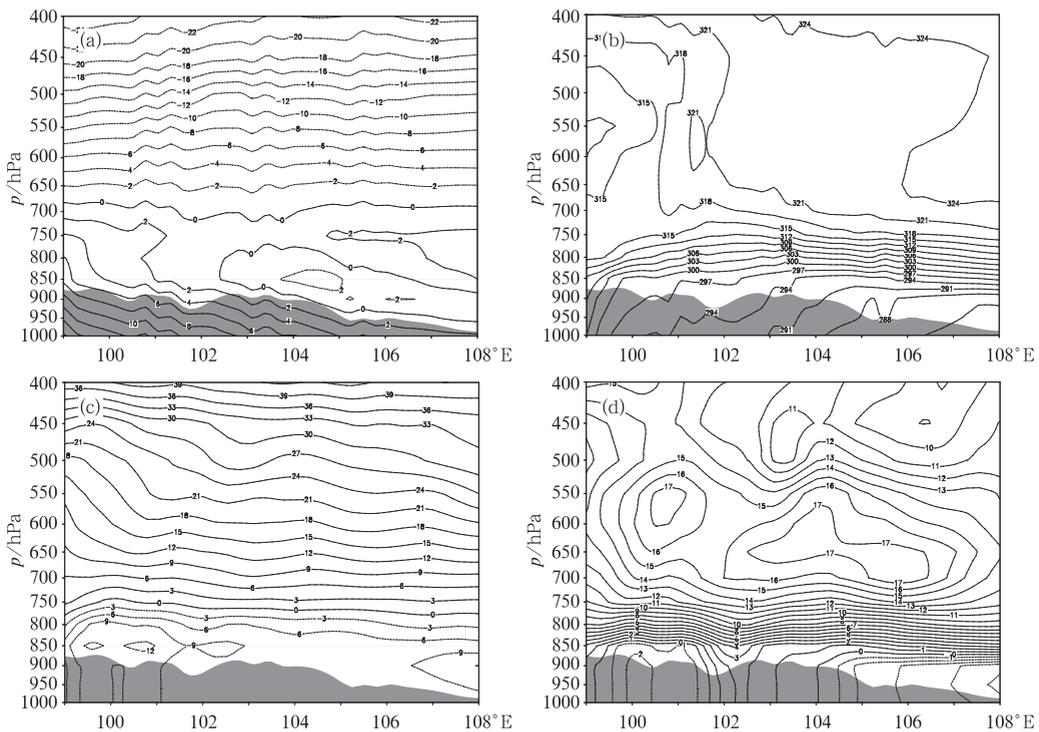


图 7 地形减半下各气象要素数值模拟沿  $26^\circ\text{N}$  剖面垂直分布  
(初始时刻:2008 年 1 月 31 日 08 时,积分 18h)

(a) 温度(单位:  $^\circ\text{C}$ ); (b) 相当位温(单位:  $\text{K}$ ); (c)  $u$  分量(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (d)  $v$  分量(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

上述地形敏感性试验表明,昆明准静止锋是云贵高原特定地形下在一定的天气系统

条件下产生的,如果降低地形高度而天气系统条件不变的情况下,昆明准静止锋系统不

存在,1月31日过程两种地形高度的数值模拟证明了这一点。因此,高原地形对北方南下冷空气的阻挡是形成和维持昆明准静止锋的必要条件。

#### 4 结论

本文利用MM5模式模拟分析2008年1—2月中国南方发生罕见低温冰雪灾害天气期间,最强一次冷空气天气过程中昆明准静止锋的结构特征。通过地形高度敏感试验,定量分析地形对昆明准静止锋形成和维持作用。主要结论如下:

(1)从本次模拟的结果看,MM5模式能较准确地再现昆明准静止锋的结构特征和移动过程。模拟的昆明准静止锋的结构特征,除本次过程中南支槽旺盛,造成水汽充沛,锋区两边湿度场差别不大外,其他结构特征与文献[2]分析的结论基本一致。

(2)从模式模拟昆明准静止锋的移动看,在冷空气条件下,昆明准静止锋的形成和维持是高原地形对冷空气的阻挡和乌拉尔山阻高、东亚槽、副高、南支槽等环流系统的特定配置共同作用的结果。

(3)通过地形减半的敏感数值试验,发现冷空气强度和其他条件不变,如果地形阻

挡作用减小(地形高度减少一半),昆明准静止锋将不会形成,而且冷空气的路径也将由偏东路径改变为东北路径。从模式数值试验结果定量分析得到高原地形阻挡作用是昆明准静止锋形成和维持的必要条件。

#### 参考文献

- [1] 樊平. 昆明准静止锋[J]. 天气月刊, 1956, 3(副刊): 14-16.
- [2] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 205-209.
- [3] 李英, 段旭, 潘里娜. 昆明准静止锋的准地转Q矢量分析[J]. 气象, 1999, 25(8): 6-10.
- [4] 李英. 条件性对称不稳定与昆明准静止锋风雹[J]. 热带气象学报, 1999, 15(3): 273-279.
- [5] 尤红, 曹中和, 郭文华, 等. 昆明静止锋下的云南倒春寒天气分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 56-62.
- [6] 杜正静, 丁治英, 张书余. 2001年1月滇黔准静止锋在演变过程中的结构及大气环流特征分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(3): 284-292.
- [7] 李子良. 地形降水试验和背风回流降水机制[J]. 气象, 2006, 32(5): 10-15.
- [8] 李子良, 黄仪方. 地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验[J]. 气象, 2006, 32(11): 32-35.
- [9] 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2004年7月10日北京局地暴雨数值模拟分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 25-32.
- [10] 季亮, 费建芳. 地形对登陆台风麦莎(2005)影响的数值模拟研究[J]. 气象, 2008, 34(6): 60-66.