科学通报 2008 年 第 53 卷 第 24 期: 3134 ~ 3138
快 讯
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

# “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

彭世球[①②], 徐祥德[②*], 施晓晖[②], 王东晓[③⑤], 朱玉祥[④], 浦静姣[⑥]

① Department of Marine, Earth & Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-8208, USA;
② 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
③ 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境动力重点实验室, 广州 510301;
④ 中国气象局培训中心, 北京 100081;
⑤ 广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;
⑥ 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017
* 联系人, E-mail: xuxd@cams.cma.gov.cn

2008-06-02 收稿, 2008-10-22 接受
中日政府间 JICA 渠道技术合作项目、科技部国际合作项目(编号: 2007DFB20210)、国家自然科学基金(批准号: 90502003 和 40625017)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金重点项目(批准号: 2008Z006)和灾害天气国家重点实验室自主研究项目(编号: 2008LASWZI04)资助

摘要 采用 WRF 模式多时间层三维变分同化技术(3DVAR), 将青藏高原及其周边地区 AWS 自动气象站观测网多要素资料同化进数值模式的初始场, 对发生于 2008 年 1 月中国南方及长江中下游特大雪灾天气进行数值模拟试验. 由于青藏高原具有极其陡峭的大地形坡面, 且高耸于对流层中部, 故分布于高原大地形“坡面”不同高度的自动站网观测要素, 将与无线电探空探测获取的大气“廓线”信息存在着某种程度的关联性, 其不仅在观测点高度、梯度特征, 而且在观测时间频数、“定点”、“定高”及其同步性等方面均具有不同于平原自动站、常规探空的特殊功能优势. 高原大地形坡面自动站网信息同化场亦可提供高原东部下游天气系统高敏感区前兆性“强信号”, 并实现模式高原及周边区域初始场大气动力、热力三维结构客观化调整, 从而提升下游区域灾害天气系统模拟与预报能力. 研究表明, 青藏高原及其周边地区自动站的水汽、温度、气压等资料同化信息对于预报下游区域的降水预报至关重要.

关键词
自动气象站资料
三维变分同化(3DVAR)
青藏高原
暴风雪
数值模拟

青藏高原被称为“世界屋脊”, 是世界上面积最大、海拔高度最高的高原. 由于其独特的地形特征, 青藏高原在全球能量和水分循环中具有重要和特殊的作用. 青藏高原面积约为中国国土面积的 1/4, 但气象观测站点十分稀少, 这一问题使得对高原及其下游地区(尤其是长江流域以及其他东亚国家)高影响天气进行的预测具有较大的不确定性.

正如 WWRP/THORPEX“观测系统研究与可预报性试验”(The Observing System Research and Predictability Experiment: A World Weather Research Program)中国计划中所提到的, 对于某一所关心的高影响天气预报对象, 在其上游地区通常存在着对应的预报敏感区域, 该区域的观测对改进预报质量最有效, 贡献最大. 如果能确定这一敏感区域并选取有效的观测要素, 然后将这些观测资料同化到数值模式中, 将会大大提高其下游地区的高影响天气数值预报水平[1]. “世界屋脊”青藏高原(QXP)的东南部边缘正好位于孟加拉湾向长江-淮河流域进行水汽输送的通道上[2,3], 同时其大地形可作为周边大气的热源和汇, 故其对下游区域(如长江-淮河流域和华南地区)的天气和气候都有着十分重要的影响[4~7]. 因此, 高原东南缘地表温度和水汽状况对于预报长江-淮河流域和华南地区的降水非常重要.

如何应用青藏高原及其周边天气气候敏感地区的观测要素来提高长江-淮河流域和华南地区的降水预报精度将是一项十分有意义的工作. 为了认识高原天气系统及其对流云结构对东亚中国地区洪涝灾害影响以及提高数值模式高原边界层参数化技术水平, 在过去十年里, 中日合作JICA项目建立高原东-西、南-北向剖面及其周边地区(中国西南地区)GPS水汽观测、边界层通量、AWS自动站综合观测网. 上述高原及周边新一代综合观测系统可揭示出长江-淮河流域灾害天气上游敏感区动力、热力结构及其前兆性“强信号”结构.

近年来, 随着遥感和高性能计算机技术的发展, 以及新的数据同化方法的出现, 如三维、四维变分同化(3DVAR, 4DVAR)[8~10]、卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波[11~13]等, 资料同化已经成为天气预报中一个重要的方面. 许多研究表明, 采用先进的资料同化技术能够极大地提高天气预报的结果[14~16]. 但是, 如何将青藏高原及其周边地区的气象综合观测网信息(例如AWS自动气象站等观测要素)应用于数值预报模式(MM5 或WRF等), 以改进下游区域降水预报的技术途径仍然是尚未解决的“瓶颈”问题. 众所周知, 2008 年 1 月在长江中下游省份发生了百年一遇的大范围严重冰雪灾害. 因此, 探讨高原及周边区域自动站网观测资料在数值预报模式的同化技术, 将对下游灾害天气的预警及其降水预测具有重要的学术价值与应用意义.

本文采用了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, 同化方案中选取的关键要素包括地面气温、水汽、气压(图 1). 其中, 剔除模拟样本中资料缺失或未通过质量控制标准的站点, 每个时间层上的资料同化所选入的 AWS 站点约为 15~18 个, 其数据时间层间隔为 1 h. 质量控制是通过 WRF 3DVAR 自身所带的初始化过程来完成, 包括检验其数值是否超过合理范围, 站点之间是否过密或重叠, 站点位置是否超越或太靠近模式边界, 以及站点高度与模式地面高度相差是否超过预先设定值等等. 从图 1 中可见, 于某一时间层(1 月 25 日 00:00 UTC)其资料被采用的大部分自动站分布在高原东南缘, 即位于来自孟加拉湾的海洋水汽流路经高原转向长江流域水汽通道上.

由于青藏高原“台地”位于对流层中部, 平均地面气压约 500 hPa, 且高原东南缘地势陡峭, 呈“南低北高”南-北向坡面大地形, 因此, 高原坡面上不同高度的自动站同步观测网信息某种程度能够与不同高度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(图 2). 另外, 常规探空观测为每天 2 次, 且存在着气球“漂移”误差, 尤其观测廓线数据受局地天气影响较大; 而高原坡面不同高度上自动站观测时间频率高, 甚至可达半小时或更密采样时间间隔. 将上述高原大地形坡面上不同高度的自动气象站所观测到的大气“廓线”信息同化到数值模式中, 研究其对于提高高原下游天气预报水平的效能, 无疑具有重要的学术意义及社会价值. 基于上述思路, 本文设计了如下数值模式同化试验.

本研究采用WRF模式及其三维变分同化(3DVAR)系统. WRF模式是新一代中尺度数值天气预报系统, 可用于天气预报和大气研究[17]. WRF-3DVAR系统由NCAR MMM Division的MM5-3DVAR发展而来[18]. 考虑到高原自动站资料数据采样间隔为每小时的采集密度优势, 同化方案采用了多时间层次的三维变分技术方案.

数值试验方案选取的第一个个例为 2008 年 1 月 25~28 日发生在华南大部分地区的严重暴风雪, 这次暴风雪过程给华南诸多省份造成了巨大的财产损失和人员伤亡. 数值试验所选取的模拟区域如图 1 所示. 水平分辨率为 120 km, 垂直方向分为 27 个 sigma 层. 整个试验包括:

CNTR: 控制试验, 未同化方案;

DA-1: 进行一次 3DVAR 同化方案;

DA-2: 进行多时间层(每隔 1 h) 3DVAR 同化方案.

原始的初始条件(IC)和边界条件(BC)由 NCEP 最终分析资料获取, 其空间分辨率为 1°×1°. 图 3 显示了

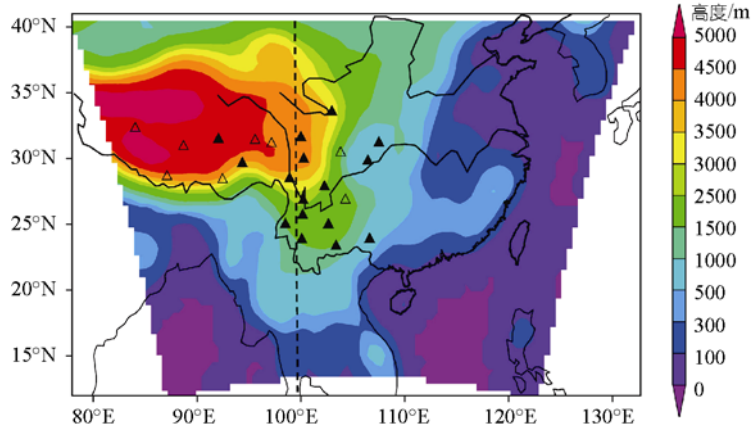


**图 1　模拟区域的地形高度及自动站的位置分布图**

实心三角形表示于某一时间层(2008 年 1 月 25 日 00:00 UTC)上资料被同化进模式的站点, 空心三角形表示缺测或未通过质量控制检验的站点

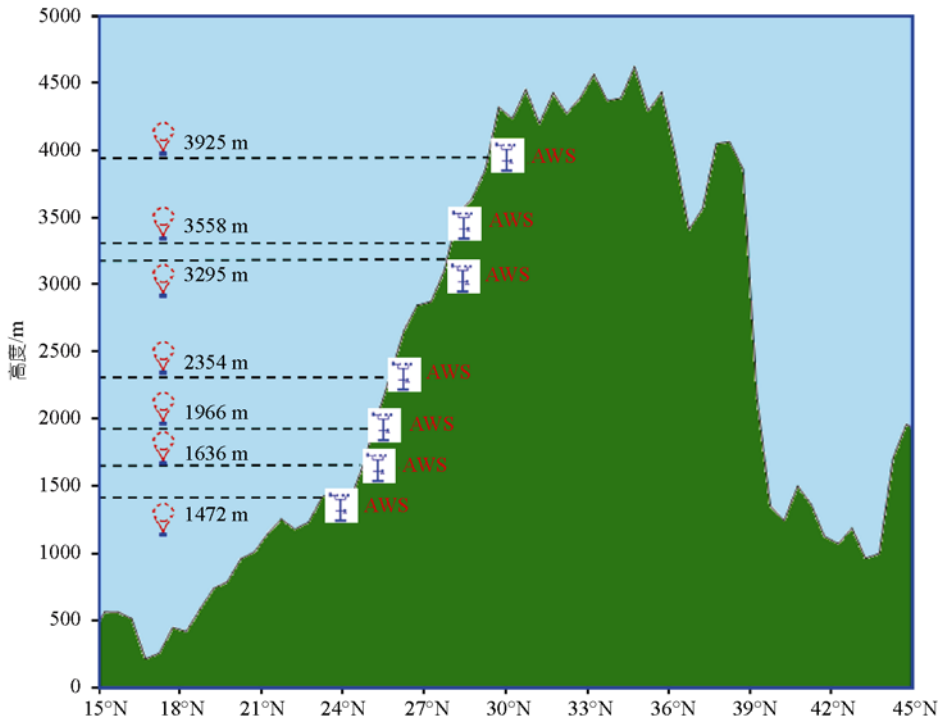


**图 2 99°E 附近剖面(如图 1 中虚线所示)上 7 个自动站的高度分布以及相应高度上的无线电探空示意图**

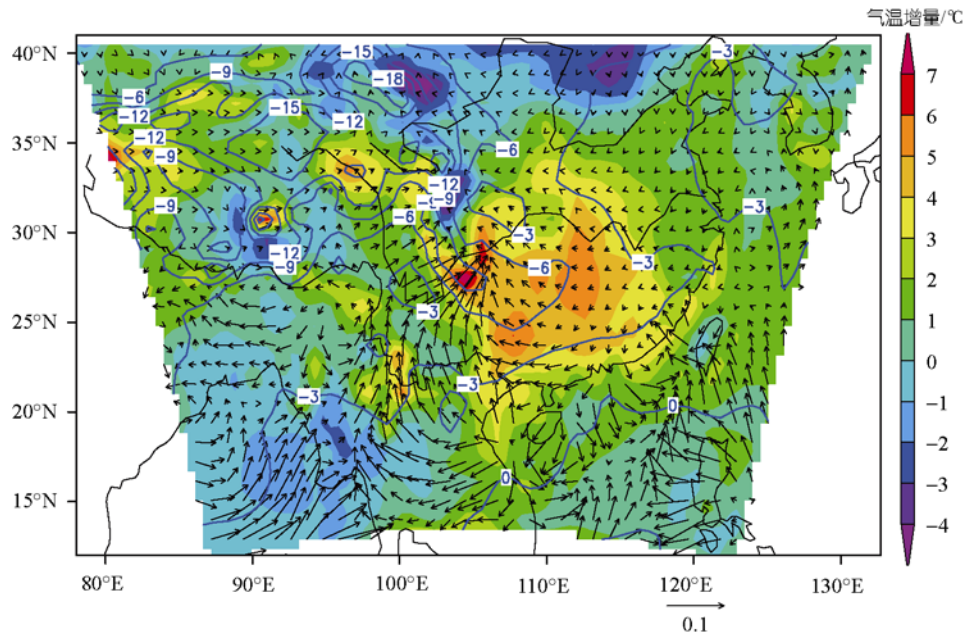


**图 3 经资料同化(DA-2)后初始场(2008 年 1 月 25 日 00:00 UTC)的海平面气压增量(蓝色实线, 单位: hPa), 以及近地面层(第 2 sigma 层)气温(阴影)和水汽通量(矢量, 单位: $kg\cdot m\cdot kg^{-1}\cdot s^{-1}$)增量**

近地面(第 2 sigma 层)初始场经过 DA-2 自动站资料同化后, 高原及周边区域水汽通量、地面气压、气温等要素场均发生了显著变化: 高原东南缘水汽通量描述出增强结构, 反映了孟加拉湾的水汽输送和青藏高原东南部的水汽汇合与“转运”站功能加强; 在青藏高原及其东部地区的海平面气压呈大幅下降, 揭示出高原东部地面低气压涡旋加强特征; 在青藏高原的下游区域, 气温亦出现了明显的增加. 图 4 显示了经过 DA-2 资料同化后的 500 hPa (约相当于青藏高原顶部的地面气压)风速 $v$ 分量初始场亦呈增量分布. 综上所述, 可以看到大地形坡面自动站网同化效果起着提升上游高原及周边大气结构分析的客观性描述能力.

上述同化处理后, 初始场调整对于暴风雪降水场模拟是否有显著提高? 为了参照对比, 对降水场的数值模拟分别采用原始初边条件(CNTR), 资料同化后的初边条件(DA-1 和 DA-2), 模式积分时间皆为

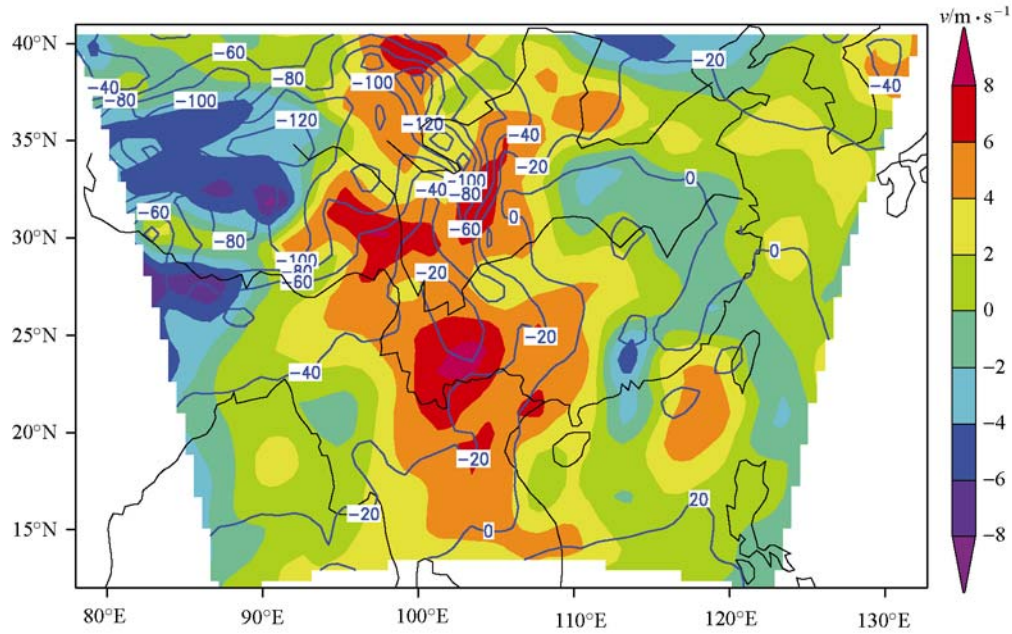


**图 4　经资料同化(DA-2)后初始场(2008 年 1 月 25 日 00∶00 UTC)500 hPa 高度上位势高度(蓝色实线，单位: m)和风速 *v* 分量增量**

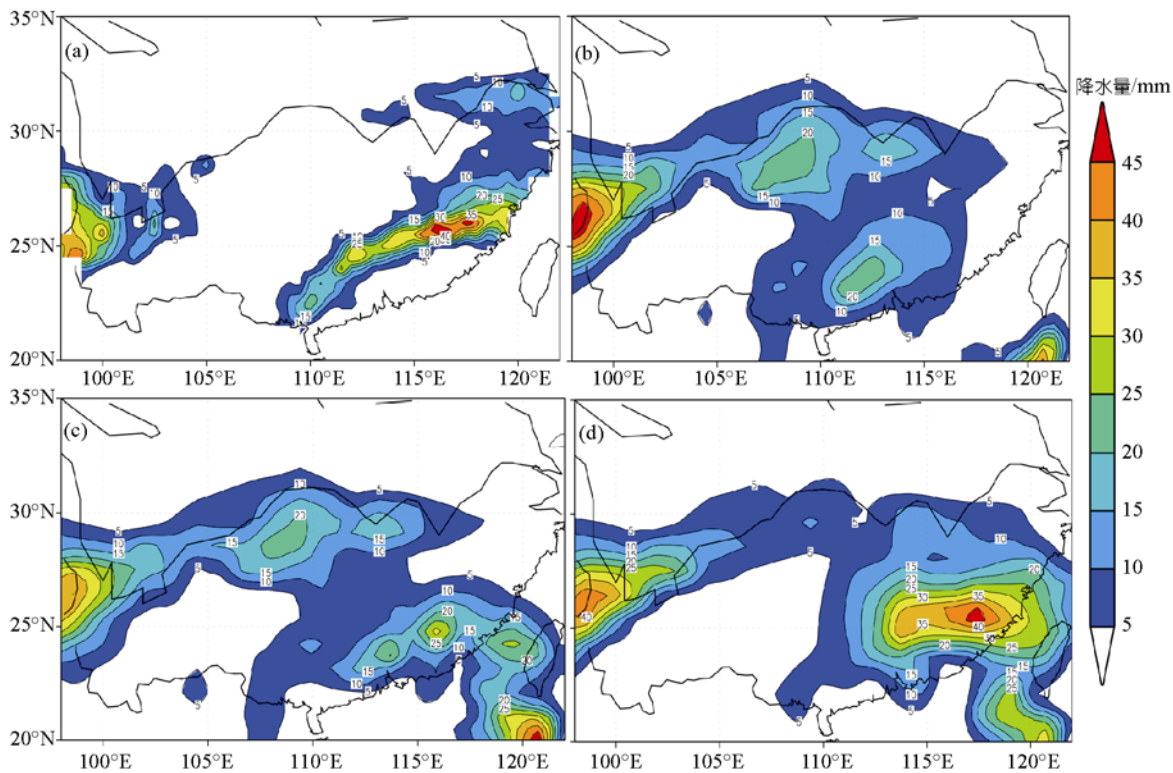


**图 5　24 小时累积降水量**

2008 年 1 月 26 日 00∶00UTC 至 27 日 00∶00 UTC: (a) 观测, (b) CNTR, (c) DA-1, (d) DA-2

2008 年 1 月 25 日 00:00 UTC~28 日 00:00 UTC. 结果显示, 经过高原自动站资料同化后, 降水模拟结果在 48 h 内有显著改善, 尤其是在 24~48 h 的时段内更为显著. 图 5 只给出了 24~48 h 的降水分布(2008 年 1 月 26 日 00:00 UTC~27 日 00:00 UTC). 从中可以看到, DA-2 的模拟结果更优于 DA-1, 尤其是在 25°~27°N, 115°~120°E 范围内, DA-2 的模拟能很好地反映出观测到的暴雪中心, 而在 CNTR 中错报的中国西南部强暴雪在 DA-2 中明显得到改善.

同样地, 将青藏高原及其周边地区的自动站资料同化进 WRF 模式中模拟 2008 年 1 月 17~20 日长江下游流域的暴风雪过程时, 也得到了类似显著效果. 因此, 采用青藏高原及其周边地区自动站资料同化对于预报青藏高原下游区域的降水十分有益. 本文数值试验结果亦揭示出高原东南缘"南低北高"大地形坡面自动气象站网的同化信息, 在一定程度上能够调整天气系统上游高敏感区大气动力、热力的三维结构, 有助于揭示出高原东部灾害性天气系统发生、发展上游敏感区"强信号"特征. 另外, 高原坡面自动站资料在监测时间频数、定位、定高及其同步性方面均具有其他探空工具所不具备的优势.

## 参考文献


1 THORPEX 中国委员会. 中国观测系统研究与可预报性试验计划(THORPEX-China). 北京: 气象出版社, 2005. 25—36
2 张人禾. El Niño 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. 高原气象, 1999, 18(4): 567—574
3 Hu G, Ding Y. A study on the energy and water cycle over Changjiang-Huaihe river basins 1991 heavy rain periods. Acta Meteor Sin, 2003, 61(2): 146—163
4 Chen L X, Reiter E R, Feng Z Q. The atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: May-August 1979. Mon Weather Rev, 1985, 113(10): 1771—1790[doi]
5 季国良, 姚兰昌, 袁福茂, 等. 1982 年冬季青藏高原地面和大气的加热场特征. 中国科学 B 辑, 1986, 2: 214—224
6 Yanai M, Li C, Song Z S. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. J Met Soc Jpn, 1992, 70(1): 319—350
7 赵平, 陈隆勋. 35 年来青藏高原大气热源、气侯特征及其与中国降水的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(4): 327—332
8 Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. Tellus Ser A-Dyn Meteorol Oceanol, 1986, 38: 97—110
9 Rabier F, Anderson E. The ECMWF implementation of three dimensional variational (3DVar) data assimilation Part Ⅱ: Structure function. Q J Roy Meteor Soc, 1997, 123: 27—52
10 Courtier P, Thepaut J-N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. Q J Roy Meteor Soc, 1994, 120: 1367—1388[doi]
11 Miller R N. Toward the application of the Kalman Filter to regional open ocean modeling. J Phys Oceanogr, 1986, 16: 72—86[doi]
12 Cohn S E, Parish D F. The behavior of forecast error covariances for a Kalman filter in two dimensions. Mon Weather Rev, 1991, 119: 1757—1785[doi]
13 Evens G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. Ocean Dyn, 2003, 53: 343—367[doi]
14 Zou X, Xiao Q. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. J Atmos Sci, 1999, 57: 836—860[doi]
15 Peng S Q, Zou X. Assimilation of ground-based GPS zenith total delay and rain gauge precipitation observations using 4D-Var and their impact on short-range QPF. J Met Soc Jpn, 2003, 82: 491—506 [doi]
16 Gu J, Xiao Q, Kuo Y H, et al. Assimilation and simulation of Typhoon Rusa (2002) using the WRF system. Adv Atmos Sci, 2005, 22(3): 415—427[doi]
17 Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. Design of a Next-generation Regional Weather Research and Forecast Model: Towards Tera-computing. New Jersey: World Scientific, River Edge, 1998. 117—124
18 Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A three-dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: Implementation and initial results. Mon Weather Rev, 2004, 132: 897—914[doi]