第 26 卷 第 4 期
2010 年 08 月

热 带 气 象 学 报
JOURNAL OF TROPICAL METEOROLOGY

Vol.26, No.4
Aug., 2010

文章编号：1004-4965(2010)04-0489-05

一种新的地面气压插值方案在计算低于模式地形的观测相当量中的研究

连治华，薛纪善

（中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081）

摘　　要：中国地形复杂，致使特定分辨率的模式地形与实际地形常存在一定差别。如何在复杂地形条件下设计数值预报模式中合理的地面气象要素的计算方案，对我国地面观测资料在中尺度数值模式中的充分应用有着非常重要的意义。利用 GRAPES 模式变量计算低于模式面的实际台站高度上的气压方案，采用基于静力平衡的气压外推方法计算地面气压，并与实际观测的地面气压进行比较，两者基本吻合。又利用新的计算方案讨论了地面气压观测的质量控制问题，新的质量控制方案大大扩充了目前地面资料在同化中的使用率。

关　键　词：数值天气预报；地面气压计算；静力平衡的外插方案；质量控制

中图分类号：P456.7　　**文献标识码：**A　　**Doi：**10.3969/j.issn.1004-4965.2010.04.014

1 引　　言

目前，中尺度数值模式中用到的观测资料包括遥感观测资料（如卫星、雷达等）常规探空、地面观测（地面观测站与地面自动站）资料等。其中，遥感资料虽然时空分辨率高，但由于其观测量并不是模式变量，同化时需采取特殊方法。探空网的探测点稀疏（间距一般在300 km或以上），单纯用他们作客观分析会使得同化结果缺乏中尺度信息。地面观测资料相对其他资料而言，其观测要素一般与模式变量相同，而时空分辨率比常规探空资料高。因此，如何充分有效地利用地面观测资料，并把他们和其他资料融合为数值天气预报所需要的初始场、改善数值模式预报水平，是当今国内外不少气象工作者正在努力解决的问题。

中国的地形复杂多样，山地、高原和丘陵约占全国陆地面积的 65%，整体地势自西向东呈阶梯状分布。由于受到分辨率等因素的制约，目前的数值预报模式还不能完全真实反映自然地形，致使特定分辨率的模式地形与实际地形存在一定差别，这种差别对观测资料的同化与模式结果的解释、应用都有很大影响。例如将 GRAPES 模式地形与我国 2 000 多个地面观测站高度对比发现，有的测站高度与模式地形高度差异可达 1 000 m 以上，而且差异大小在全国的分布也很不均匀。对流层中气温一般随高度而降低，其具体数值在不同地区、不同季节、不同高度是不一致的。当模式地形与地面观测站存在高度较大差异时，模式模拟的温度就与观测的温度有大的差异，模式实际上无法接受这样的观测资料。目前地面资料使用率低下的内在原因：一是模式地形与实际观测站高度存在较大差异，致使观测数据与模式观测相当量（由数值模式变量计算出的观测要素量值）存在很大偏差；二是观测量属于近地面层内的要素，其空间变化受到边界层物理过程的支配，同化系统难以与之匹配。

在较早提出的地面观测资料同化方案中，气象科学研究者就考虑到模式地形与实际地形存在的高度差异，提出了一些解决方案，如1996年Ruggiero等[1]在考虑模式地形与实际观测站高度有差异的情况下，利用近地层相似理论设计的同化方案：① 当测站高度大于模式最低层高度，则将地面观测资料作为高空资料进入模式；② 当模式最低层高度高出测站高度超过100 m，该站点资料剔除不用；③ 当模式最低层高度比测站高度高，且模式最低层高度

收稿日期：2009-01-12；**修订日期：**2009-04-29
基金项目：国家重点基础发展计划（2004GB418306）资助
通讯作者：连治华，女，新疆区人，硕士，主要从事数值预报方向的研究。E-mail：lzh0805@126.com

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

高出测站的高度小于100 m，则利用背景场信息将该站点观测资料反演到模式最低层。这种方案不需要复杂的观测算子和相应的切线和伴随程序，但由于方案与实际情况偏差很大，会使许多观测资料被剔除，没有将资料充分利用起来。为了解决Ruggiero方案中的不足，2002年Guo[2]假定所有测站的资料都是位于模式地面，然后利用相似理论建立10 m高度风场(u_{10}，v_{10})和2 m高度温度(T_2)、湿度(q_2)的观测算子及相应的切线和伴随模式，地面观测资料得到了充分利用，并取得了一定的效果。这种方案比前一种方案更充分地利用观测资料，但却没有考虑模式地形与实际测站地形的高度差异，当地面观测资料与其他资料同时进行同化分析时，两种地形高度差异就会造成模式中各物理量场不协调。2007年徐枝芳等[3-4]基于MM5_3DVAR/WRF_3DVAR系统比较了Guo做法的优劣，并在此基础上又提出了改进：① 在地面观测误差中增加由于模式地形与观测站地形高度差异引起的地形代表性误差；② 增加了温度订正法。这个同化方案能较有效合理地将地面资料同化到数值模式中，且模拟结果改善效果较好。但当模式地形与观测站高度差异较大时，这两种改进方案得到的效果都明显退化。且上述工作对地面气压观测的使用研究很少，实际上地面气压的变化受到局地边界层过程的影响比其他地面要素要小得多，因此在反映天气系统的演变中可能有更大的利用价值。但正因其受边界层过程的影响相对较小，一般的资料同化中往往把他们简单地与探空资料用相同方式使用，使其使用率大幅降低。

地面资料同化的难点在于“模式观测相当量”的计算。实际的观测值与模式观测相当量的差（即“新息量”）是目前几乎所有资料同化方案计算分析场的基本依据，通常也是对观测进行质量控制的依据。且模式的地面观测相当量还是重要的数值预报产品。过去的工作偏重于模式与测站的高度差订正，但分析表明这只涉及问题的一部分，更重要的是改进地面观测的插值算法。本文根据目前通行的非静力中尺度模式GRAPES-Meso提出了新的计算方案计算地面气压观测相当量，并与实际观测结果进行了对比，其结果比GRAPES目前使用的计算方案有明显改进，增加了地面资料的使用率。

本文的内容安排如下：第 2 节介绍基于静力平衡的气压外推法的基本方案，包括插值算法的具体推导，以及其在 GRAPES 系统中的具体应用；第 3 节对GRAPES系统中的原方案和新方案的计算结果进行了比较试验；第 4 节讨论新方案中地面气压观测的质量控制问题；第 5 节采用新的质量控制系数，对进入 GRAPES 同化系统中的资料进行了效果评估；第 6 节是总结。

2 地面气压插值计算方案的设计和建立

计算观测点地面气压的观测相当量的方法，根据观测与模式地形高度差异而有所不同。对于高于模式最低层的观测点，采用一般的内插公式（如三次样条等方法）容易比较准确地计算获得；对于低于模式最低层的观测点（在GRAPES模式中，大概占观测数的75%），采用如下基于静力平衡的气压外推方案。

2.1 地面气压外插计算公式推导

设邻近地面的两个模式面的气压、温度与位势高度分别为：p_1、p_2、T_1、T_2、Φ_1、Φ_2。引入一个中间面 p_3、T_3、Φ_3，其中 p_3、T_3 分别满足，

$$\ln p_3 = (\ln p_1 + \ln p_2)/2 \tag{1}$$

$$T_3 = (T_1 + T_2)/2 \tag{2}$$

假定气层内的温度是 ln$p$ 的线性函数，即，

$$T(p) = T(p_1) + \Gamma(\ln p - \ln p_1) \tag{3}$$

式中 Γ 是常数。根据静力方程，

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \ln p} = -RT \tag{4}$$

将式（3）代入，并以 p_3 为起点积分得到，

$$\Phi(p) = \Phi_3 - RT_3(\ln p - \ln p_3) - \frac{R\Gamma}{2}(\ln p - \ln p_3)^2 \tag{5}$$

以式（1）、（2）代入式（5），即，

$$\Phi(p) = \Phi_3 - R\frac{T_1+T_2}{2}(\ln p - \frac{\ln p_1 + \ln p_2}{2}) - \frac{R\Gamma}{2}(\ln p - \frac{\ln p_1 + \ln p_2}{2})^2 \tag{6}$$

当求地面的气压时，$\Phi = \Phi_s$，$p = p_s$，式（6）为，

$$a(\ln p_s - \frac{\ln p_1 + \ln p_2}{2})^2 + 2b(\ln p_s - \frac{\ln p_1 + \ln p_2}{2}) + 2(\Phi_s - \Phi_3) = 0 \tag{7}$$

其中，

$$a = R\Gamma,\ b = R(T_1 + T_2)/2 \tag{8}$$

Φ_3 可由式（3）、（4）计算得到，即，

$$\Phi_3 = \frac{1}{2}(\Phi_1 + \Phi_2) + \frac{R\Gamma}{8}(\ln p_2 - \ln p_1)^2 \tag{9}$$

式（7）是一个关于 $(\ln p_s - \frac{\ln p_1 + \ln p_2}{2})$ 的一元二

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

次方程，可以直接求解得到，

$$\ln p_s - \ln p_3 = -\frac{1}{b}(a \pm \sqrt{a^2 - 2b(\Phi_s - \Phi_3)} \qquad (10)$$

式中由于观测点位于最低层模式面之下，有 $\Phi_s - \Phi_3 < 0$，即 $a^2 - 2b(\Phi_s - \Phi_3) \geq 0$，且 $\ln p_s - \ln p_3 > 0$，则由式（10）可推出，

$$\ln p_s = -\ln p_3 + \frac{-2(\Phi_s - \Phi_3)}{a + \sqrt{a^2 - 2b(\Phi_s - \Phi_3)}} \qquad (11)$$

式（8）、（9）和（11）是基于静力平衡外推法计算地面气压方案的基本公式，可得到地面气压的观测相当量，并用此值进行以下的试验。

2.2　GRAPES模式中地面气压的计算

本文使用的模式是中国气象科学研究院数值预报研究中心研究和开发的GRAPES模式[5－7]。GRAPES模式的垂直坐标采用Gal-Chen和Somerville (1975)提出的高度地形追随坐标(height-based terrain following coordinate)。与目前通行的多数数值预报模式相似，模式层采用非均匀分层。模式预报变量的设置采用Charney-Philips跳层设计，其中预报变量 p 和 q 分别位于模式的半层和整层上（图1）。

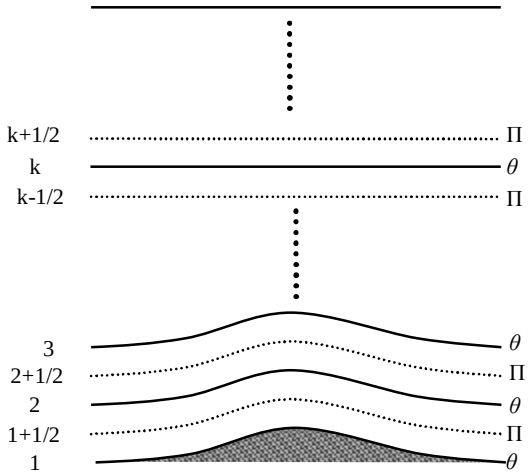

图1　GRAPES系统模式变量垂直分布

已知模式面的模式变量 p_i 和 q_i，利用式（8）、（9）和（11）可以对 GREPES 的地面气压观测相当量或模式地面气压进行计算。式中的 P_1、P_2 和 T_1、T_2 按如下方法获得。

取 p_1 为模式面的气压 $p_{1+1/2}$，p_2 为模式面的气压 $p_{2+1/2}$。根据定义，

$$p_{k+1/2} = p_0(\pi_{k+1/2})^{C_P/R} \quad (k = 1, 2) \qquad (12)$$

式中的 p_0 为常数。

取 T_1 为模式面的温度 $T_{1+1/2}$，T_2 为模式面的温度 $T_{2+1/2}$。根据定义，

$$T_{2+1/2} = q_{2+1/2} p_{2+1/2} \qquad (13)$$

其中，

$$q_{2+1/2} = \sqrt{q_2 q_3} \qquad (14)$$

由式（3）和 $T_{2+1/2}$ 即可求得 $T_{1+1/2}$。其中温度递减率 Γ 近似为，

$$\Gamma = \Gamma_h \frac{h_3 - h_1}{2(\ln p_{1+1/2} - \ln p_{2+1/2})} \qquad (15)$$

式中 h_1 和 h_3 为模式面的高度，Γ_h 取 0.65 ℃/100 m。

3　新旧方案计算结果的比较试验

采用上述地面气压的计算方案（以下称新方案），与目前 GRAPES 地面气压的计算方案（以下称旧方案）进行方案计算结果的比较试验。新方案对低于模式面最低层的观测站，在考虑低层大气近似满足静力平衡、温度与气压的线性关系的基础上采用上述计算方案，计算其地面气压的观测相当量。旧方案对低于模式面最低层的观测站，直接用模式最低层的气压作为地面气压的观测相当量。

试验选取的区域为 15～64.5 °N，70～145 °E，分析系统是 GRAPES 模式面三维变分同化分析系统，同化背景场为 T_{213} 的 12 小时预报场。试验的观测资料选用 2007 年 7 月 16 日 00 UCT 的地面气压资料（SYNOP），共有 2 816 个观测站。其中低于模式面最底层的观测站有 2 238 个，占总资料数的 80%左右。试验仅选用低于模式面最底层的观测站。对比试验结果如图 2。

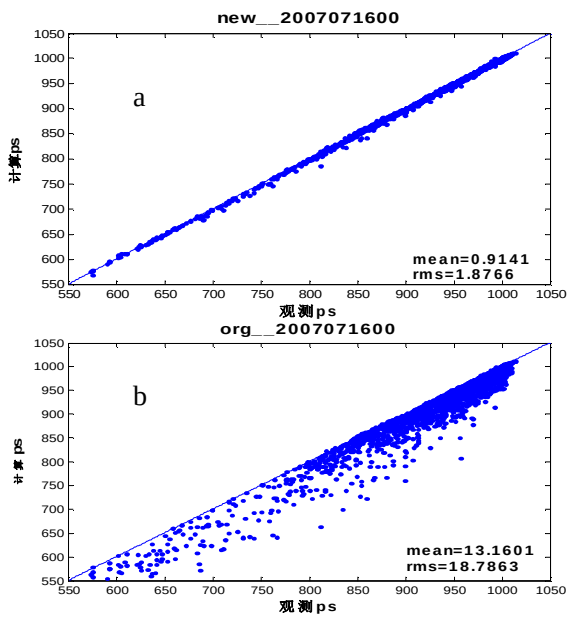

图 2　地面气压新息向量的统计特征

a. 新方案；b. 旧方案。

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

图 2a、2b 分别为新、旧方案的计算结果，图中横坐标表示实际观测的地面气压，纵坐标表示用背景场插值得到的地面气压观测相当量；实线的斜率为 1，表示理想状态下实际观测的地面气压与地面气压观测相当量相等；mean 表示两者的平均偏差，rms 表示两者之差的均方根。通常可以认为，地面观测站的地面气压是相对准确的（除了极个别资料），模式短期预报的模式面的高度、气压和温度也是比较准确的。在插值计算方案较好的情况下，实际观测的地面气压与地面气压观测相当量的偏差应该比较小。由图 2 可知，新方案的平均偏差和均方根都远小于旧方案，量级比较合理；而旧方案明显过大。由此可见，新的计算地面气压方案更为可取。

4 地面气压的质量控制系数的确定

大气观测资料不是完全正确的，其含有几种误差，包括仪器误差和人为误差；也可能包含“代表性误差”。因为有重大误差的观测可以造成分析质量明显变差，于是在分析中有趋于保守使用观测的倾向，这往往使得一些有价值的观测没有得到很好应用。近年来对观测资料的质量控制系统趋于成熟，许多原来被舍弃的资料现在被订正或被利用，导致对初始场的改进，因而也使预报得到改进。

质量控制以观测值与某种期望值（可以是观测相当量、气候值、邻近观测或初始值的平均）的比较为基础。期望值与观测值的差称为“残差”。如果“残差”非常大，可能认为观测是有错的。期望值的估计越完善，质量控制算法越有辨别力，即它能更好地区别观测值是否可信。

GRAPES 中地面气压观测的质量控制为：对于每一个观测站的地面气压观测值 y_o，与由背景场插值到该测站的值(地面气压观测相当量)$H(x)$进行比较，计算出两者之间的差异值(新息向量)d，

$$d = y_o - H(x) \qquad (16)$$

若这个差异值超过最大阀值 T，则认为该测站观测值有误，应予剔除。这个阀值为地面气压质量控制系数 qc 与经验给定的观测误差 ε_o 的乘积，

$$T = qc \times e_o \qquad (17)$$

为得到 qc 的值进行了以下试验。试验区域、模式与第 3 节的试验相同。所用的观测资料是 2007 年 7 月 0000、0006、0012 和 0018 UTC 的 SYNOP 地面气压资料。图 3 为 2007 年 7 月 4 个时次总的新息向量样本分布，横坐标表示新息向量值，纵坐标表示以 500 为间隔的样本数量。可看出新息向量样本的数量在 d 为 0 附近最多。d 的样本均值 μ 为 -0.583 8，均方差 σ 为 1.367 3。图 3 中的曲线为理论上服从 N（-0.583 8，1.367 3^2）的正态分布的频率，中间的长虚线表示均值所在的位置，旁边两条短虚线表示 $\mu\pm2\sigma$ 的位置。考虑到 GRAPES 系统中地面气压观测值的观测误差 ε_o 一般在 0.8 hPa 左右，根据正态函数理论，落在（μ-2σ，μ+2σ）内的样本数量可以达到总数的 95.44%，以及式（17）可以近似把 qc 的值定为 3.5。

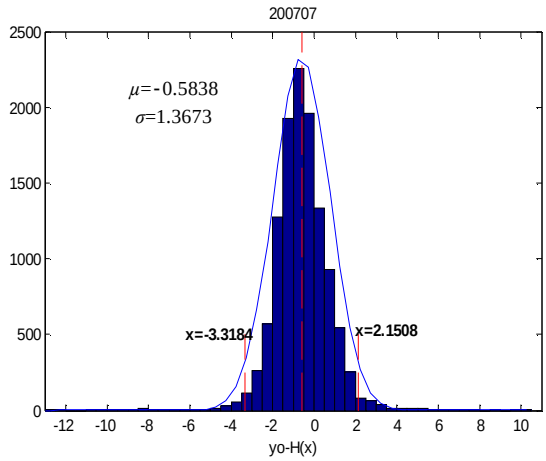

图 3 d 的实际分布概率直方图与理论的概率曲线
横坐标为新息向量值，纵坐标为以 500 为间隔的样本数量。

5 在 GRAPES 同化系统中的资料应用效果

如同第 3 节，新方案和旧方案进行 GRAPES 同化系统中资料应用效果的对比试验。试验选取的分析区域为 15～64.5 °N，70～145 °E，分析系统是 GRAPES 模式面三维变分同化分析系统，同化背景场为 T_{213} 的 12 小时预报场。试验的观测资料仍选用 2007 年 7 月 16 日 0000 UCT 的 SYNOP 地面气压资料，低于模式最低层的共有 2 238 个观测站。图 4a、4b 分别为采用新、旧方案可以进入同化系统的站点资料，图中灰色点表示进入同化系统的站点，黑色点表示质量控制后被剔除的站点。正如第 3 节已述，地面观测站的地面气压一般认为是准确的。采用新方案后，有 1 972 个站点进入同化系统，而旧方案只进入了 654 个。可见，新方案使观测资料利用率比旧方案提高一倍以上，大大增加了站点的利用率，减少了资源的浪费。

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

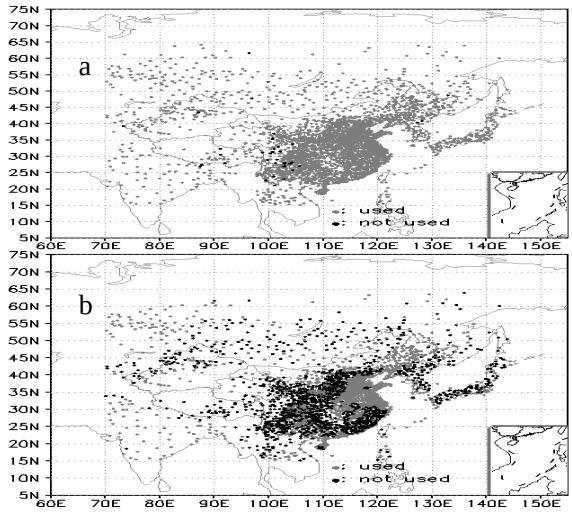

图 4　站点资料利用情况　a. 新方案；b. 旧方案。

6 总　　结

（1） 新的地面气压计算方案获得的地面气压观测相当量与实际地面气压观测基本吻合。对于实际观测与观测相当量的平均偏差和偏差均方根，新的计算方案的量级比较合理，且都远小于目前的 GRAPES 方案；而后者明显过大。

（2） 新的地面气压计算方案确定的质量控制参数可定为 3.5，即当观测相当量与实际观测之差大于 3.5 倍观测误差时，认为实际观测不可信，予以剔除。根据正态函数理论有近 95.44%的样本可利用。

（3） 采用新的地面气压计算方案之后，观测资料利用率比目前的 GRAPES 方案提高一倍以上，大大增加了资料利用率，减少资源的浪费。

本文设计的地面气压插值计算方案，除可应用于GRAPES三维变分同化方案及GRAPES系统后处理，为模式提供更合理的地面气压场外，还可推广于近地面层其他需要进行气压外插的计算方案。

致　谢:本文写作过程中得到了朱宗申研究员和陆慧娟博士的帮助，在此表示诚挚的感谢。

参　考　文　献:

[1] RUGGIERO F H, SASHEGYI K D, MADALA R V, et al. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model[J]. Mon Wea Rev，1996，124(5)：1 018-1 033.

[2] GUO Y R. Application of the MM5 3DVAR System for a Heavy Rain Case over the Korean Peninsula[C]. The Twelfth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop NCAR, 2002(6).

[3] 徐枝芳，龚建东，王建捷，等. 复杂地形下地面观测资料同化 I：模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31（2）：222-232.

[4] 徐枝芳，龚建东，王建捷，等. 复杂地形下地面观测资料同化Ⅱ：模式地形与观测站地形高度差异代表性误差[J]. 大气科学，2007，31（3）：449-458.

[5] 薛纪善，庄世宇，朱国富，等. GRAPES 新一代全球-区域变分同化系统研究[J]. 科学通报，2008，53（20）：2 408-2 417.

[6] 薛纪善，陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京：科学出版社，2008.

[7] 庄世宇，薛纪善，朱国富，等. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验[J]. 大气科学, 2005，29（6）：872-884.

A NEW SURFACE PRESSURE INTERPOLATION SCHEME FOR CALCULATION OF OBSERVATIONS-EQUIVALENT QUANTITIES LOWER THAN MODEL TERRAIN

LIAN Zhi-hua,　　XUE Ji-shan

（State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China）

Abstract: Since the topographic distribution of China is very complex, there exist elevation differences between the measurements from surface observation stations and numerical model outputs. The surface observation data are currently used only as backup or in process analysis, with insufficient use in numerical models. Reasonable calculation schemes of surface observation data are able to incorporate these data into numerical models sufficiently. In this paper, the prediction variables of GRAPES are interpolated to surface observations by a pressure extrapolation scheme for static equilibrium. Then the calculated surface pressures and surface observation data are compared. Most of the calculated surface pressures are consistent with the surface observations. Quality control in the observed surface pressure is discussed with the new calculation scheme and we can see that the surface observation data can be used much more efficiently than before.

Key words: numerical prediction; surface pressure calculation; static equilibrium; quality control

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com