

探空气球漂移及其对数值预报影响的研究*

刘红亚¹⁾ 薛纪善²⁾ 沈桐立¹⁾ 庄世宇²⁾ 朱国富²⁾

¹⁾(南京信息工程大学,南京 210044) ²⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

为了考察探空资料随高度的漂移对高分辨率数值预报模式的影响,充分发掘探空资料的应用价值,根据探空资料的探测原理,设计定位方案,计算出了各气压层上探空气球所处的实际位置。对位置订正前后的资料分别用 3D-VAR 系统进行同化,将同化结果作为 WRF 模式的初始场进行数值预报并对预报效果进行对比分析。结果表明:探空气球在施放过程中的漂移距离远远超过目前数值模式可取的水平分辨率;所设计的探空气球定位方案对水平分辨率为 10 km × 10 km 的数值预报模式基本是可用的;总的来讲,位置订正对分析增量场的改变与原分析增量场相比小一个量级。模式预报结果显示,探空资料的定位使降水预报效果得到了改善。研究表明,将各气压层上探空资料订正到实际位置对高分辨率数值预报模式的预报效果有一定程度的正面影响,但仍需要更多的个例来验证。

关键词:探空资料 定位 3D-VAR 对比分析

引 言

常规探空是由探空气球携带无线电探空仪器,配以无线电经纬仪或测风追踪雷达,以 400 m/min 左右的升速,可升空 30 ~ 40 km,进行温、压、湿、风的观测^[1],它的最长工作时间为 2 h,信息传播距离 200 km。一直以来,我们对常规探空资料的应用局限于施放探空气球台站的位置,并不考虑气球上升过程中随气流的漂移。郑良杰^[2]在华东中尺度天气系统诊断分析时曾考虑到探空资料漂移带来的空间和时间上的偏差,并对设计方案进行订正,结果除了气象要素的量值起了一些变化,并无太大影响,此后再未看到这方面的研究成果。随着数值预报的发展,模式的分辨率越来越高,可达十几公里甚至几公里,而探空气球在整个施放过程中的漂移一般为几十公里,最大超过 100 km,已大大超出了数值预报模式分辨率。为了深入了解探空资料的漂移对高分辨率数值预报模式的影响程度,我们应用 3D-VAR 资料同化方案,对位置订正前后的探空资料分别进行了同化分析和模式预报。

1 探空气球在各气压层上的精确定位

1.1 高空风的计算

与地面测风不同,高空风是某一时段内某一气层厚度上气流方向和速度的平均值,可

* 国家自然科学基金项目 40233036 和国家“十五”科技攻关项目 2001 BA607B 共同资助。

2004-01-19 收到,2004-05-08 收到修改稿。

由该时段内水平位移除以该段时间间隔来得到,在 t_{n-1} 到 t_n 时段内,气球所经过的气层中气流的水平平均速度即为该层的平均风速,计算公式为^[1]:

$$\overline{V}_n = \frac{S_n - S_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1)$$

在实际工作中规定两个高度之间 $(h_{n-1} + h_n)/2$ 或两个时间 $(t_{n-1} + t_n)/2$ 之间的平均风向、风速作为该气层的风向和风速。

1.2 等压面高度的计算

等压面的高度单位为 gpm , 两层等压面之间的厚度可由下式计算^[1]:

$$\delta H = \frac{R_d}{g} T_v \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad (2)$$

式(2)中 p_2 和 p_1 分别为层顶和层底的气压, T_v 为空气层的平均虚温(绝对温标), R_d 为干空气气体常数, g 为标准重力加速度,各常数的取值如下:

$$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

$$R_d = 0.28765 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

将各等压面之间厚度进行累加,即为各等压面的海拔高度。

1.3 相邻气压层间隔时间的计算

因为探空气球的高度由各层高度的累加得到,我们可以利用气压层的高度和气球升速来计算相邻两层的时间间隔,既然相邻两气压层的高度 H_n 和 H_{n-1} 已知,气球升速 w 可看作常量,因此,气球通过相邻两气压层所需时间便可通过下式来计算:

$$\delta t_n = (H_n - H_{n-1})/w \quad (3)$$

式(3)中 δt_n 为气球从 H_{n-1} 高度升到 H_n 高度所需的时间。

1.4 相邻气压层位移的计算

因为位移是矢量,可通过计算经向和纬向的分量来求得,取两气压层上风速的平均值作为两层间的风速,再乘以时间便得到位移。方法如下:

$$\text{纬向位移: } \delta x_n = (u_n + u_{n-1}) \times \delta t_n / 2.0 \quad (4)$$

$$\text{经向位移: } \delta y_n = (v_n + v_{n-1}) \times \delta t_n / 2.0 \quad (5)$$

式(4)、(5)中 δx_n 、 δy_n 分别为 $n-1$ 到 n 层的纬向和经向位移, u_n (v_n)、 u_{n-1} (v_{n-1}) 分别为 n 层和 $n-1$ 层的纬向(经向)平均风速, δt_n 为气球从 $n-1$ 层上升到 n 层所经过的时间。

1.5 各气压层上气球位置订正

求出相邻各层间的位移后,便可将它们转换成经纬度的变化,然后通过累加即得出各气压层上气球所在经纬度的值。

$$\text{经度的计算: } x_n = x_{n-1} + 180.0 \times \delta x_n / (\pi \times R_e \times \cos \varphi) \quad (6)$$

$$\text{纬度的计算: } y_n = y_{n-1} + 180.0 \times \delta y_n / (\pi \times R_e) \quad (7)$$

式(6)、(7)中 x_n (y_n)、 x_{n-1} (y_{n-1}) 分别为 n 层和 $n-1$ 层的经(纬)度; δx 、 δy 分别为 $n-1$ 层到 n 层的纬向和经向位移; π 为圆周率,取值 3.1415926; R_e 为地球半径,取值 6378150.0 m; φ 为测站所在的纬度。

应用式(3)~(7),便可计算出各气压层上探空气球所在的精确位置。

2 探空气球位置随高度变化及计算值与实测值偏差的统计分析

2.1 气球位置随高度变化的统计分析

为了了解探空气球的实际漂移情况,对我国 90 多个探空站 2003 年 3 月 3 日 00:00 (世界时,下同)到 3 月 5 日 12:00 共 6 个时次的 400 多个样本进行了统计分析,结果见图 1。

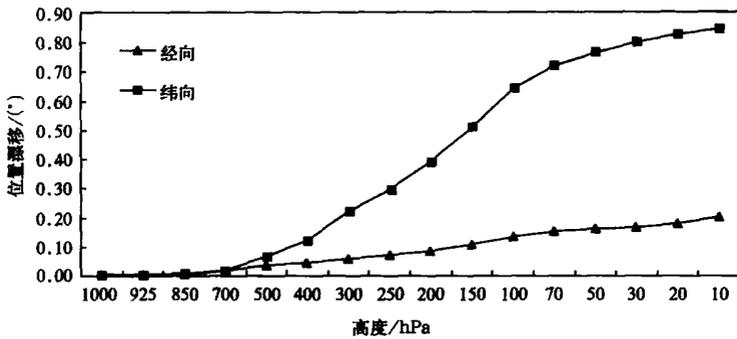


图 1 探空气球位置漂移随高度的变化

由图 1 可以看出,探空气球在 500 hPa 以上开始有明显漂移,且经向漂移较小,平均在 150 hPa 上达到 0.1°,10 hPa 上超过 0.2°(约 20 km);纬向偏移较大,在 150 hPa 达到 0.5°,10 hPa 上达到 0.85°(约 80 km)。

2.2 计算值与实测值偏差的统计分析

由于探空资料的实测位置和时间资料的获取不太方便,我们在对比试验中采用了上述计算方案。为了解计算值与实测值的偏差,又用相同的资料进行了计算值与实测值偏离程度的距平统计分析,结果见图 2。

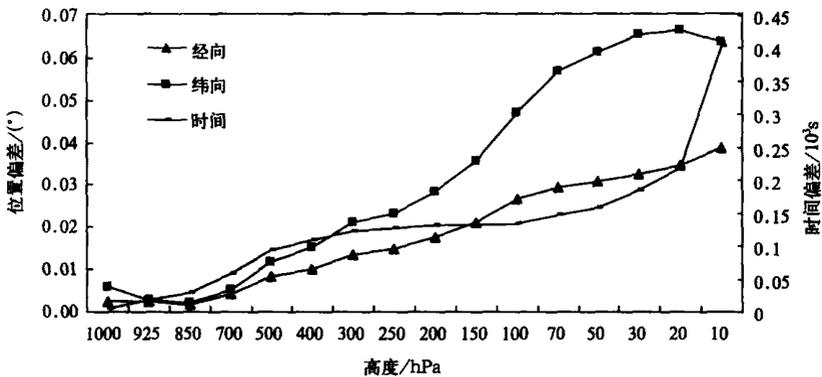


图 2 计算值与实测值的偏差随高度的变化

从图 2 可以看出,实测探空气球随气流的漂移与计算位置基本吻合,平均距平也是经向小纬向大,经向偏差在 30 hPa 上不超过 0.04°(约 4 km),纬向偏差在 30 hPa 上不超过

0.07°(约 7 km),时间偏差在 30 hPa 约为 180 s。

由以上分析可见,探空气球随高度的漂移对分辨率小于 1°的高分辨率数值预报模式是有影响的,分辨率越高影响越大,对高分辨率模式我们应当考虑到这一点;同样,即使对分辨率达到 0.1°的模式,用计算所得的探空气球经纬度数值来代替实际位置对结果的影响也基本可以忽略。因此,用计算值来进行探空气球漂移对水平分辨率为 10 km 的数值模式初始场影响试验是可行的。

3 应用 3D-VAR 同化方案对定位前后资料同化结果的对比分析

2003年6月29日12:00至30日12:00,淮河流域大范围降水,苏皖北部、河南东南部普遍达到暴雨到大暴雨的量级,其中江苏泗阳为 149 mm,安徽蒙城、太和分别为 160 mm 和 159 mm,河南汝南达到 136 mm(图 3)。当时地面图上从四川盆地沿江淮之间一直到黄海中部为一条梅雨锋,对应的高空为副高边缘的切变线,整个高低空配置十分有利于降水,这次降雨在淮河流域持续了约一周时间,我们选取降水开始时雨带由江南北跳到淮河流域的 24 h 强降水过程。

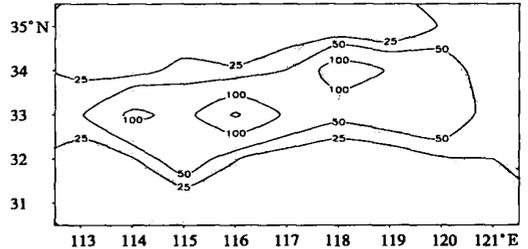


图 3 2003 年 6 月 29 ~ 30 日 24 h 降水实况图(单位: mm)

我们使用同时次 T213 预报场作为背景场,采用垂直 17 层(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa),水平方向用双线性插值方法插值到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的经纬网格点上,应用 3D-VAR 分析方案^[3],分辨率同样取 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,对 2003 年 6 月 29 日 12:00 位置订正前后的探空资料进行了相对湿度、位势高度、经向风速和纬向风速 4 个要素的对比分析试验,相对湿度的变化如图 4 所示。

通过位置订正前后各气压层上相对湿度分析增量场的变化可以看出(图 4): ① 位置订正所带来的变化在低层较小,随着高度的增加,变化幅度呈增大的趋势,但不同气象要素略有不同。温度、气压、风场的增大趋势较明显,但由于相对湿度和大气各层的水汽含量有较大关系,高层水汽含量少,随高度的变化略显复杂。② 淮河流域强降水区上空存在一个分析增量场订正值的大值区,它与梅雨锋切变线位置基本一致。由于切变线附近风速较大,各物理量的梯度也较大,并且气象要素变化比较剧烈,探空资料的漂移所带来的影响也就比较明显,我们称这种区域为“探空气球漂移的敏感区”,同时也说明位置订正对剧烈天气反应较敏感。③ 一些订正值的增量中心与订正前的分析增量场中心基本吻合,表明这些地区的观测信息对背景资料有更明显的修正作用。④ 总的来讲,位置订正带来的变化较原来的分析增量场小一个量级。

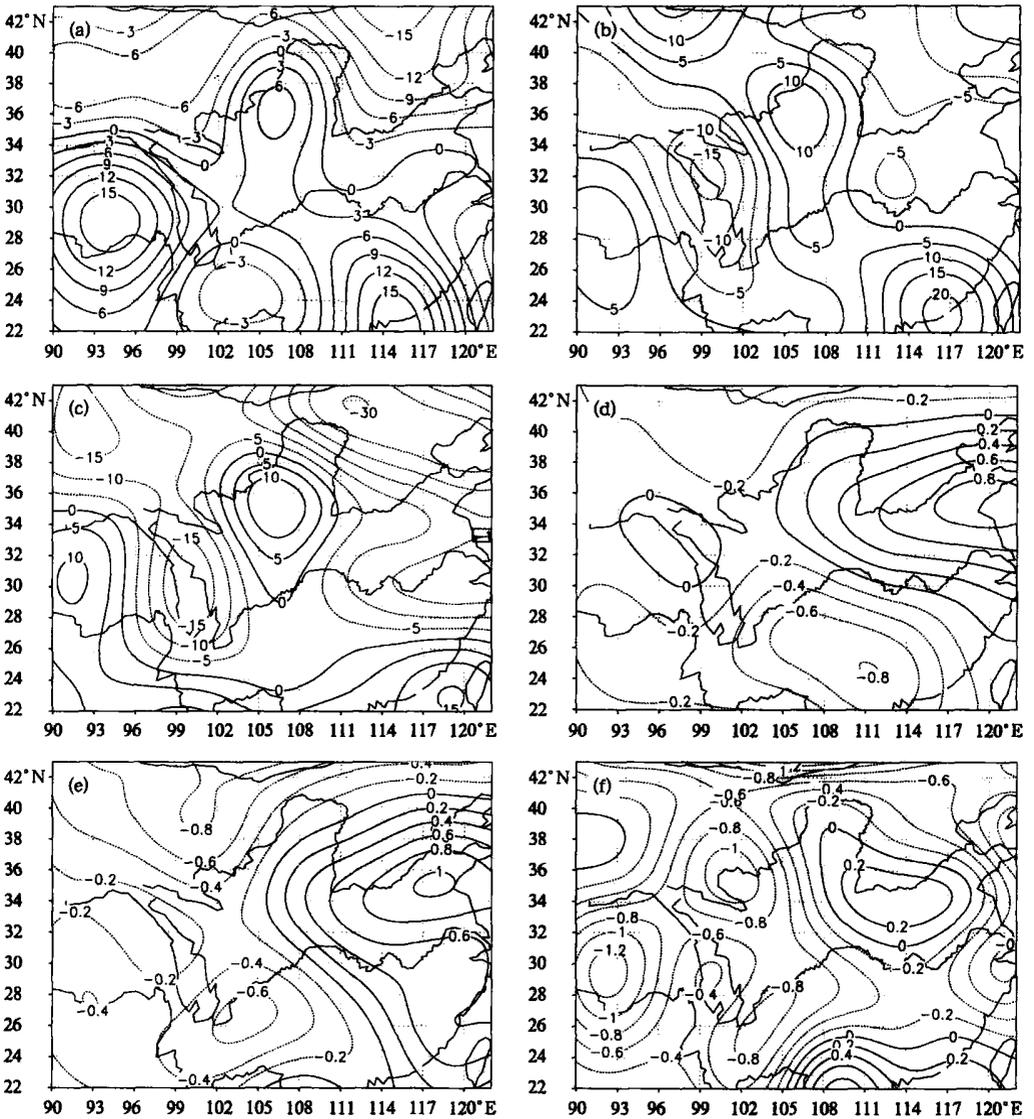


图4 位置订正前后相对湿度分析增量场在各气压层上的变化(单位: %)

位置订正前相对湿度分析量场(a) 700 hPa,(b) 500 hPa,(c) 300 hPa和位置订正后相对湿度分析增量场相对于位置订正前的改变量(d) 700 hPa,(e) 500 hPa,(f) 300 hPa

4 探空资料定位对降水预报结果的影响

4.1 模式方案

分别用探空资料位置订正前后生成的两个分析场作为初始场,由6月29日00:00 T213的24 h和36 h预报场提供边界条件,应用WRF模式,采用下述数值预报方案,对

这次淮河流域的强降水过程进行了 24 h 降水预报对比分析。模式的主要参数选择方案如下:格点数 180×180 , 格距 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, 时间步长 60 s, 地图投影 Lambert, 中心经纬度为 31.5° N 115.0° E , 欧拉质量坐标, 垂直 35 层, 模式层顶高 21 km, 微物理过程采用 Ferrier(new Eta) 过程, 长波辐射方案为 RRTM 方案, 短波辐射方案为 Dudhia 方案, 陆面层选用热扩散方案, 积云方案采用 Kair Fritsch(new Eta) 方案。

4.2 预报结果的对比分析

我们应用以上资料和方案,对这次过程进行了 24 h 预报对比试验,分析探空资料的位置订正对降水预报的敏感性,预报结果见图 5。

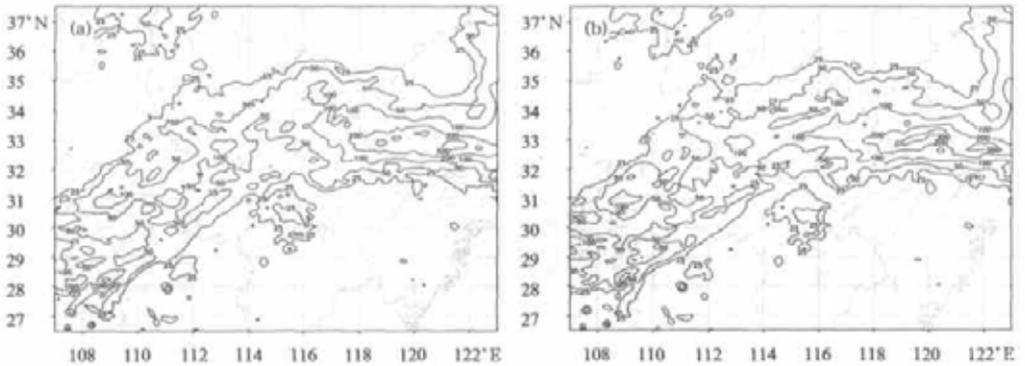


图 5 2003 年 6 月 29 日 12:00 至 30 日 12:00 24 h 降水量预报结果(单位: mm)

(a) 位置订正前, (b) 位置订正后

从预报结果可以看出,对这次强降水过程,模式预报与实况是比较吻合的,整个雨带的范围、走向和强降雨中心都预报得较好,但降雨强度偏强。位置订正对整个雨带走向无太大影响,但对小区域的降水分布及强度有一定影响。为了进一步说明探空资料的位置订正带来的影响,我们做了订正后的预报降水与订正前预报降水之差,即位置订正前后雨量场的变化(图 6)和离阜阳探空站(32.92° N , 115.82° E) 较近的蒙城站(33.3° N , 116.5° E) 单点每小时预报降水量的对比(图 7)。

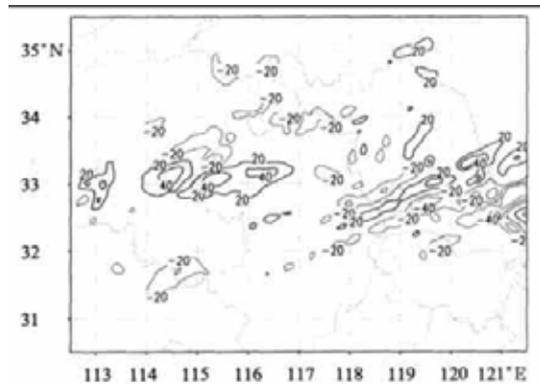


图 6 位置订正后雨量场的变化(单位: mm)

图 6 表明,探空资料位置未经订正时强降水中心有所偏南,订正后泗阳、蒙城、太和、汝南一线的强降水中心区降雨量明显增强,而远离强降水中心的地方降水则明显减弱,表明探空资料的位置订正使得 24 h 降水预报更接近实际。但由于本试验仅使用了标准层的探空资料且仅 1 个时次,观测信息进来较少,预报和实况还存在一定的差距。比如位置

订正前后最大降水中心均位于江苏中部地区,表明背景场起了很大作用,但总体上来讲,定位使预报结果得到了改善。

由图 7 可见,除积分开始 3 h 由积云对流方案产生的降水外,预报 6 h 左右开始出现降水,随后降水强度快速增强,预报 14 h 后,降水高峰结束,强度减弱。蒙城站 24 h 总降水量预报结果为:位置订正前 108 mm,订正后 141 mm,相差 33 mm;而蒙城站 24 h 降水量达 160 mm,可见位置订正后的 24 h 降水预报更接近实况。

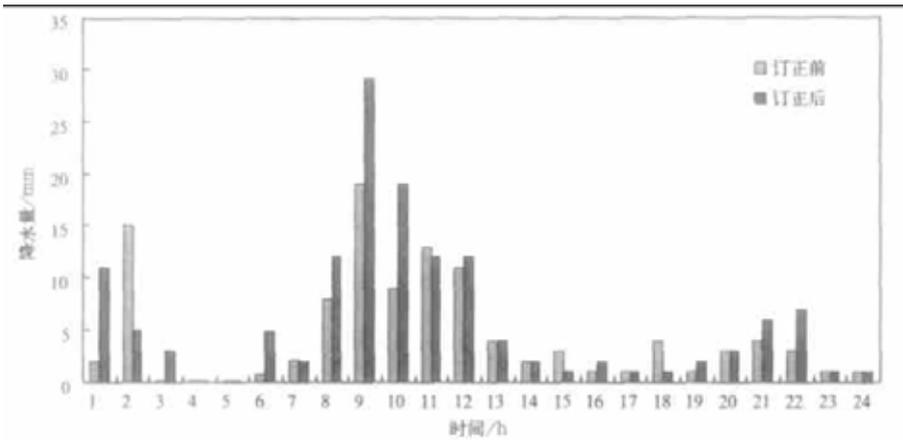


图 7 位置订正前后蒙城站每小时降水预报对比(单位:mm)

5 结论和讨论

通过以上分析和对比实验,得出以下几点结论:

(1) 探空气球一般在 500 hPa 以上才开始有明显漂移,且经向漂移较小,在 150 hPa 上平均达到 0.1° ,10 hPa 上超过 0.2° ;纬向漂移较大,在 150 hPa 上平均达到 0.5° ,10 hPa 上达到 0.85° ;单站最大漂移距离超过 100 km。同时说明以前格距在 100 km 以上的数值模式忽略探空资料的漂移也是合理的。

(2) 应用本文计算方案所得气球在各气压层的位置与实测探空气球随气流的漂移基本吻合,经向偏差在 30 hPa 上不超过 0.04° ,纬向偏差在 30 hPa 上不超过 0.07° ,对水平格距在 10 km 左右的数值预报模式是适用的。

(3) 位置订正给分析场所带来的变化在低层较小,随着高度的增加,变化幅度也随之增大,且在风速较大、气象要素水平梯度较大的地区,探空资料的定位影响也较大,要素梯度与风向交角越小,影响越明显。

(4) 位置订正会使模式降水预报结果朝更接近实际状况的方向发展,降水区的高低中心分布和降雨量都得到一定程度的修正。

本文仅是一个个例的研究,不同个例对探空资料随高度漂移的敏感程度可能会有些差别,以上结论仍需要更多这类个例的研究来验证。同时,对本项工作有影响和应当注意的地方,我们认为有以下几个方面:

(1) 必须搞清楚“天气系统的尺度”、“数值预报模式的格距”、“观测站(或观测资料)的间距”3个概念之间的关系^[4]。探空资料定位主要贡献在于提高了观测资料的准确性,使得预报模式的初值更加精确,但我们不能期望间隔在300 km以上的探空资料通过定位就能对中小尺度天气系统的监测能力有多大提高,只有将初始场应用到数值预报模式中去进行计算,才能看出其对预报结果的影响程度。

(2) 条件允许的情况下,可使用实测位置信息。

(3) 在实际操作方面,可使用6 h间歇同化^[5]等方法,进行多次同化,以使初始场更加精确,和预报模式更加协调。

(4) 同时同化其他探测资料(如雷达资料等),以使得初始场更加接近大气的实际状态。

(5) 所取的是夏季的个例,总体上风速比冬季要小,因此分析增量场的改变量不是太大,若取冬季个例,效果可能会更加明显。

参 考 文 献

- 1 张霭琛.现代气象观测.北京:北京大学出版社,2000.300~301,271~274,327~331.
- 2 郑良杰.中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟.北京:气象出版社,1989.5~12.
- 3 张华,薛纪善,庄世宇,等.GRAPES三维变分同化系统的理想试验.气象学报,2004,62(1):31~41.
- 4 廖洞贤.大气数值模式的设计.北京:气象出版社,1999.60~62.
- 5 朱宗申,马清云,郝民,等.HUBEX区域资料同化系统.应用气象学报,2002,13(2):170~177.

STUDY ON SOUNDING BALLOON DRIFTING AND ITS IMPACT ON NUMERICAL PREDICTIONS

Liu Hongya¹⁾ Xue Jishan²⁾ Shen Tongli¹⁾ Zhuang Shiyu²⁾ Zhu Guofu²⁾

¹⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

To investigate the impact of height-depending sounding balloon's drifting on numerical prediction and extract to the full utility of soundings, a positioning scheme is designed to locate the balloon's position at every pressure level, based on sounding principles. Data used before and after the position correcting are assimilated using the 3D-VAR system separately, with the assimilations applied as the initial field of the WRF model for predictions, which then undergo analysis for comparison. The main results are as follows: (1) the distance a sounding balloon drifts during operation is a lot longer than that is accepted as a horizontal resolution by present numerical models; (2) the positioning scheme presented for sounding balloons is basically applicable to a resolution of 10 km × 10 km; (3) on the whole, the position correction leads to the fact that the resulting analytic increment field is one order of magnitude smaller than the original; (4) analysis of the model predictions shows that soundings,

when positioned, would improve predictions. Moreover, the accurate position correction of leveled soundings will better the output of high-resolution numerical models to some extent but further case studies are needed.

Key words: Sounding data Positioning 3D-VAR Comparative analysis