

数值预报同化系统中观测资料误差分析

陶士伟¹ 郝 民¹ 薛纪善² 窦以文³

(1. 国家气象中心,北京 100081;2. 中国气象科学研究院;3. 北京市气象局)

提 要: 在观测资料同化系统中,观测误差均方差与背景场误差均方差共同决定着观测信息与背景场信息的相对重要性以及这些信息在空间及不同变量间的扩展方式,故在资料同化系统中起到决定性作用。因此,观测误差均方差的合理估计是非常重要的。采用贝塞尔函数拟合方法,从探空观测资料与背景场的偏差(IV)协方差中分离出探空资料的观测误差均方差与模式的背景场误差均方差;再从其他观测资料偏差协方差中扣除背景场误差均方差来估计其它观测误差均方差。观测误差均方差分析使用2006年8月1—31日观测资料,国家气象中心T213L31全球中期分析预报系统的6小时预报作为背景场。结果显示估计的观测误差均方差是比较合理的。

关键词: 误差分析 贝塞尔函数拟合 观测误差均方差

Analyses of Observation Data Error in Numerical Forecasting Assimilation System

Tao Shiwei¹ Hao Min¹ Xue Jishan² Duo Yiwen³

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. Beijing Meteorology Bureau)

Abstract: It is important to suitably estimate the root mean square of observation error in a given assimilation system. Firstly, by using Bessel fitting method, the root mean square of observation error and root mean square of first guess error are separated from the covariance of the deviation of radio-sounding observation and first guess. Then the root mean square of other observation error for other observation types are estimated by deducting the root mean square of first guess error from the covariance of the deviation of radio-sounding observation and first guess. The observation data during 1—31, August 2006 and the first guess from T213 numerical weather prediction system are used for analyzing the root mean square of observation error. The results show that the estimated root mean square of observation error for each observation type is reasonable.

Key Words: error analyses Bessel fitting root mean square of observation error

引 言

资料同化需要综合处理来自两方面的信息:前一次同化过程预报模式提供的背景场信息和当前时刻的观测信息。按最优估计理论,这两种信息对同化结果的贡献取决于各自误差均方差的统计特征以及不同变量间的相互关系^[1]。因此,充分了解观测误差均方差的量级及分布特征对正确地融合使用观测资料是至关重要的。在同化系统中定义的观测误差均方差既包含与观测仪器性能有关的误差,还包含与模式分辨率相关的代表误差。因此它不仅与观测仪器和观测手段有关,也与模式分辨率有关。所以,对于不同的同化系统,观测误差均方差的三维结构特征应该是不同的。我国的数值预报同化系统中使用的观测误差均方差大多是从国外同化系统中引进的,不完全适合于我们的同化系统,因而有必要针对我们的同化系统估计各种观测资料观测误差均方差的三维结构特征。

由于实际模式大气的真值并不知道,观测误差均方差是不可能直接测定的。只有在一定的合理假设条件下,通过合适的统计方法来估计。对于观测仪器比较统一、观测站固定且相对密集的观测资料(如探空资料),利用 BESSEL 拟合理论从观测资料和背景场(6 小时预报)的偏差(简称 IV)中分离出区域平均的观测误差均方差与背景误差均方差(简称背景误差)。这种方法被简称 IV 方法。IV 方法是 Hollingsworth 等^[2-3]在 Gandin^[4]和 Rutherford^[5]的想法上提出的。Xu 等^[6-7](简称 XW01)针对 Hollingsworth 等的工作进行了优化,提出了更为合理的正定约束条件和表达计算方式。对美国海军全球模式和北美地区观测的北美地区误差三维结构特征进行了分析。国家气象中心 2004 年曾用 IV 方法估计全球预报同化系统背景

场误差均方差及其相关的三维结构^[8]。但是没有针对各种观测资料的观测误差均方差做细致的估计分析。本文的目的在于探索一种可行的观测资料误差均方差估计方法。即先利用 IV 方法从探空资料 IV 中分离出观测误差均方差与背景场误差均方差,然后,对于其他非常规观测资料,利用从 IV 均方差中扣除背景场误差均方差的方法估计其它观测误差均方差。分析使用 2006 年 8 月 1—31 日观测资料,国家气象中心 T213L31 全球中期分析预报系统的 6 小时预报作为背景场。

值得说明的是,观测误差均方差只是观测资料误差的一个重要方面,另一个重要方面是观测资料的系统性误差,即平均偏差。在同化系统中假设观测资料和背景场都是无偏的,如果观测资料或背景场有偏,则同化结果也将是有偏的。实际的背景场和观测资料都可能是有偏的。但是,在没有一个相对无偏的参照场时,分析观测资料系统性误差是比较困难的。这里只简单分析 IV 平均现象及可能原因。

1 IV 拟合方法基本原理及资料预处理

若背景场和观测都是无偏、观测误差均方差与背景误差不相关、各站之间观测误差均方差不相关、背景误差在水平方向均匀且各向同性的假定成立时,IV 值的协方差可以写成:

$$\begin{aligned} C(r_{ij}) &= \langle d_i d_j \rangle \\ &= \langle e_i^o e_j^o \rangle + \langle e_i^f e_j^f \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

式中 f 表示背景场, o 表示观测, e 表示误差; IV 值定义为 $d = e^o - e^f$, 用 \langle, \rangle 表示数学期望。

当 $r_{ij} \neq 0$ 时, 上式给出背景误差的协方差; 当 $r_{ij} = 0$ 时, 成为背景误差均方差和观测误差均方差之和。所有可能的站点对的 $\langle d_i d_j \rangle$ 值则给出背景误差协方差随距离 r

变化的函数。由 $r_{ij} \neq 0$ 的点可以拟合出背景误差协方差函数曲线,外推拟合曲线在 $r_{ij} = 0$ 时的值被看作是背景误差均方差,同时由 IV 值方差减去背景误差均方差就得到观测误差均方差。

在半无限空间 $0 \leq r < \infty$,质量场 $C_{zz}(r)$ 的水平二维贝塞尔函数拟合形式为:

$$C_{zz}(r) = \int S_{zz}(k) J_0(kr) k dk \quad (2)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 是 0 阶贝塞尔函数,功率谱

$$S_{zz}(k) = \int C_{zz}(r) J_0(kr) r dr \quad (3)$$

式(2)和(3)的离散形式分别为式(4)和(5):

$$C_{zz}(r) = \sum S_{zz}(k_i) J_0(k_i r) \quad (4)$$

$$S_{zz}(k) = \sum C_{zz}(r_i) J_0(r_i k) \quad (5)$$

风资料为矢量场,需要把 u 、 v 分量转换成两点间极坐标的切向风(tt)和径向风(ll),然后用贝塞尔函数拟合。风资料水平二维贝塞尔函数拟合形式为:

$$C_u(r) + C_u(r) = \int [S_u(k) + S_u(k)] J_0(kr) k dk \quad (6)$$

$$C_u(r) - C_u(r) = - \int [S_u(k) - S_u(k)] J_2(kr) k dk \quad (7)$$

其中

$$S_u(k) + S_u(k) = \int [C_u(r) + C_u(r)] J_0(kr) r dr \quad (8)$$

$$S_u(k) - S_u(k) = - \int [C_u(r) - C_u(r)] J_2(kr) r dr \quad (9)$$

式(6)和(7)的离散形式分别为式(10)和(11)

$$C_u(r) = \frac{1}{2} \sum_0 [S_u(k_i) + S_u(k_i)] J_0(k_i r) - \frac{1}{2} \sum_0 [S_u(k_i) - S_u(k_i)] J_2(k_i r) \quad (10)$$

$$C_u(r) = \frac{1}{2} \sum_0 [S_u(k_i) + S_u(k_i)] J_0(k_i r) + \frac{1}{2} \sum_0 [S_u(k_i) - S_u(k_i)] J_2(k_i r) \quad (11)$$

$$S_u(k) = \frac{1}{2} \sum [C_u(r) + C_u(r)] J_0(kr) r dr - \frac{1}{2} \sum [C_u(r) - C_u(r)] J_2(kr) r dr \quad (12)$$

$$S_u(k) = \frac{1}{2} \sum [C_u(r) + C_u(r)] J_0(kr) r dr + \frac{1}{2} \sum [C_u(r) - C_u(r)] J_2(kr) r dr \quad (13)$$

2 拟合结果分析

IV 方法统计样本采用 2006 年 8 月 1—31 日的观测资料, T213L31 全球中期分析预报系统每天 06 时和 18 时两个时次的 6 小时预报作为背景场。由于观测误差和观测资料不同,观测误差主要与观测仪器和观测方法有关,随季节性变化较小,一个月的资料可以说明一定问题。

为了排除非气象意义错误资料的影响,使统计分析结果具有足够的代表性,对观测资料进行一系列质量控制。质量控制采用综合质量控制(CQC)技术和增量极值检查技术^[9]。没有通过质量控制的观测资料不参加统计拟合。为了满足观测和背景场无偏性的假设,在求 IV 协方差之前,在各个测站分别从 IV 中扣除其平均值。实际上观测系统的不一致、地理位置的差异都不同程度地限制了背景场误差在水平方向均匀和各向同性的假设。针对这一问题,选择北美、中国、欧洲大陆三个观测系统相对一致、资料密集区分别进行统计和拟合。北美区域的选择范围是(25~65°N, 50~130°W);欧洲区域的选择范围是(30~70°N, 0~60°E);中国区域 L 波段和 59 型探空仪分别拟合。对 IV 值按时间序列计算不同站点、层次间协方差,并要求统计样本数大于 10。按照测站对的距离以 100km 间隔为节点合并站点对。对所有合并好的站点对进行拟合求出功率谱系数,并由功率谱系数反算出拟合曲线以便分离观

测误差均方差与背景误差方差。

在资料密集区,用 IV 拟合方法从 IV 中分离观测误差均方差和背景场误差均方差的精度较高^[6-8]。拟合的背景场误差均方差曲线和 IV 协方差曲线基本重合(图略),这和龚建东的结果是一致的^[8]。用中国区域 L 波段、北美区域、欧洲区域的探空温度、湿度、风资料 IV 协方差拟合的背景场误差均方差曲线的变化趋势基本一致(图略),说明不会因为不同区域背景场误差均方差的差别影响观测误差均方差。

图 1 是拟合的各种观测类型温度观测误差均方差。从图 1 可见,中国区域 L 波段、北美区域、欧洲区域探空资料温度观测误差均方差的 3 条曲线的变化趋势基本是一致的,各层不同区域观测误差均方差之间的差别在 0.2℃ 之内,说明这 3 种探空的温度观测仪的性能相似且可信度较好。从数值上分析,在底层(1000hPa),观测误差均方差较大,大约在 1.8℃ 左右。在 500~300hPa 附近,观测误差均方差最小,仅有 0.6℃ 左右,然后又逐渐变大,100hPa 处达到 1.4℃ 左右,10hPa 层处为 2.2℃。底层观测误差均方差较大主要原因是因底层实际地形、辐射、边界层及下垫面的复杂性产生的预报场代表性误差。高层观测误差均方差较大主要原因与高层太阳辐射和仪器灵敏度有关。59 型探空和其他 3 种探空仪相比,在对流层以下,温度资料观测误差均方差差别不大,但到对流层以上,59 型探空温度资料观测误差均方差明显变大。在 50hPa 以上其他探空仪的温度资料观测误差均方差比 59 型的探空仪的温度资料观测误差均方差小 0.4℃ 以上,约为 59 型温度观测误差均方差的四分之一。这说明 59 型探空温度资料观测精度比其他 3 种探空温度资料观测精度差。飞机温度观测资料主要分布在的 850~250hPa 之间。其温度观测误差均方差和探空温度资料的观

测误差均方差基本相当。卫星反演温度的观测误差均方差在(850~250hPa)的变化趋势与探空温度观测误差均方差的基本一致,随高度减小。但在底层其数值明显偏大,在 850~500hPa 偏大 0.5℃ 以上,400~300hPa 偏大 0.3℃ 左右。250hPa 相当,250hPa 以上观测误差均方差的变化趋势与探空温度观测误差均方差的相反,即随高度增加不仅没有增大反而减小,250hPa 约 0.9℃,20hPa 约 0.7℃,10hPa 约 0.5℃。这种变化说明两个问题,其一是在高层卫星辐射不受陆面地形的影响,探测的精度较高;另一方面,卫星反演用到了模式的背景场,美国模式和 T213 模式尽管不同,但基本特点是相同的,导致观测误差均方差和背景场误差均方差相关,不符合 BESSEL 误差分离原则,导致观测误差均方差虚假的偏小。

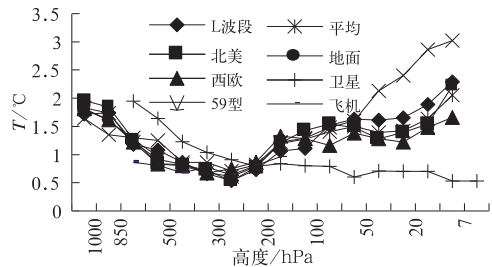


图 1 拟合的温度观测误差均方差

图 2 是温度 IV 平均。探空温度观测资料的 IV 平均曲线的变化趋势是一致的。在底层存在明显的负偏差,在 1000hPa 约在 -1.0~-2.0 之间;向上偏差逐渐减小,在 500~400hPa 接近于 0;在 400~250hPa 属于正偏差,最大约 0.5℃;200~150hPa 又属于负偏差,其值在 -1.0℃ 之内;向上偏差又逐渐减小,70~50hPa 接近于 0℃;30hPa 又存在明显的负偏差;在 20hPa 以上出现非常一场的正偏差,100hPa 处超过 2℃。尽管 IV 平均是观测系统性误差和背景场系统性误差的共同结果,但在不同层次两种误差的比重

是不同的,即它所代表的意义是不一样的。在地面层和较低层,观测的质量较好,特别是地面观测站,因为不受太阳辐射和探测仪上升而引起的温度滞后问题,存在明显的负偏差主要是由于模式特性(如模式土壤湿度偏湿)而产生背景场系统性误差;在对流层,除逆温层外,气温总体上随高度递减,在探空气球上升过程中温度探测仪或多或少存在滞后现象和太阳辐射的影响产生 IV 正平均偏差。通过对比不同的探空仪发现,北美和西欧地区温度 IV 正平均偏差小于中国 L 波段,可能原因是北美和西欧地区对观测资料订正方法和力度不同。59 型探空仪的 IV 正平均偏差更明显,说明 59 型探空仪的滞后问题更严重。在 200~30hPa 之间,IV 平均偏差呈正负交替现象,这是因为在 200~30hPa 之间温度存在逆温层、等温层、逆温层的交替现象,而对于性能相同的仪器,温度滞后问题引起的 IV 平均偏差应和温度递减率呈反比。20hPa 以上出现非正常的正偏差是因为这儿接近模式层顶,由模式后处理过程造成的。

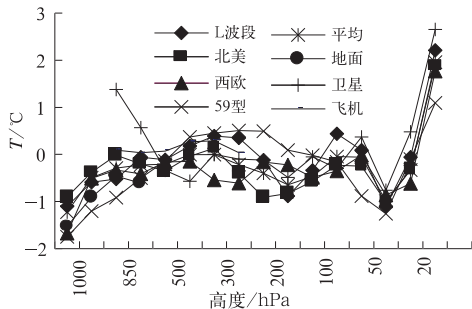


图 2 温度 IV 平均偏差

卫星反演温度在低层不仅观测误差标准差大,而且存在较大的正系统性误差,850hPa 其 IV 平均比探空温度 IV 平均高 2°C 左右,向上线性减小。到 500hPa 以上,与探空温度的相当。

飞机观测的温度主要分布在对流层(850

~250hPa)。其 IV 平均与探空温度 IV 平均的变化趋势相似。

地面站的观测温度 IV 平均和探空温度 IV 平均基本一致。

图 3 是拟合的相对湿度观测误差均方差。在 200hPa 以下,北美区域、西欧区域和 L 波段探空仪相对湿度的观测误差均方差非常一致,从 1000hPa 的 10%,到 300hPa 14% 左右。59 型探空仪的相对约小 2%~3%。对流层以上的相对湿度观测误差均方差虽然随高度增加而减小,但各种探空之间的差别在扩大。

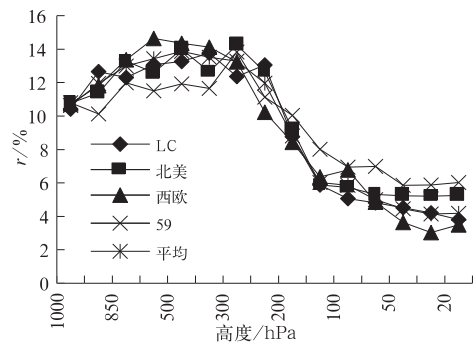


图 3 拟合相对湿度观测误差均方差

图 4 是相对湿度的 IV 平均偏差。在 100hPa 以下,北美区域、西欧区域和 59 型探空仪的相对湿度的 IV 平均偏差较小,其绝对值小于 5%。但是 L 波段探空仪系统性偏小,其 IV 平均偏差从 1000hPa 开始,随高度增加负偏差逐渐明显,200hPa 达到 -28%。其原因有待有关专家进一步分析。100hPa 以上的空气应该是干燥的,水汽含量很少,气温很低,无论是模式背景场,还是观测资料,其相对湿度计算的精度都较低。因此,虽然北美区域、59 型探空仪和 L 波段探空仪相对湿度 IV 存在 5%~10% 的正平均偏差,也不好断言是模式背景场相对湿度偏低,还是观测相对湿度偏高。

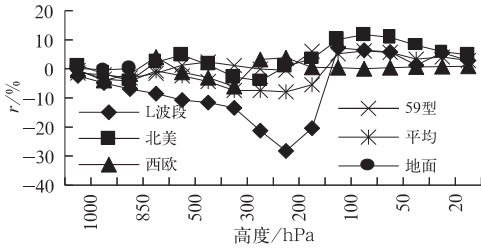


图 4 相对湿度 IV 平均偏差

图 5 是全风速观测误差均方差。除 FY-2C 卫星云导风外,各种观测风的观测误差均方差都非常一致。在 300~200hPa 之间,约 4~5m·s⁻¹,其他层次约 3m·s⁻¹左右。对于 FY-2C 卫星云导风,在 850~700hPa,其观测误差均方差比其它风的观测误差均方差差别不大,但 700hPa 以上,随高度异常地快速增加,400hPa 以上达到 10~14m·s⁻¹。FY-2C 卫星云导风观测误差均方异常大的主要原因是在高层云顶高度确定云导风性的精度低。

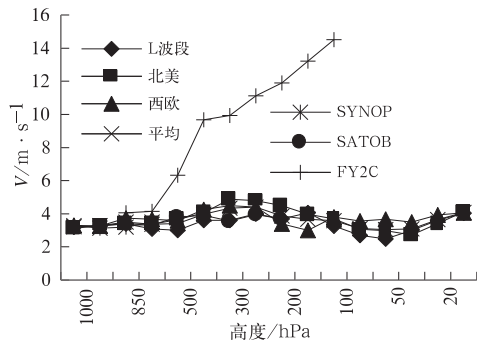


图 5 风拟合观测误差均方差

图 6 是 FY-2C 卫星云导风全风速观测误差均方差在 250~200hPa 的水平分布。总的分布情况是:在星下点附近(0°、104.5°E)和华南地区,观测误差均方差较小;高纬地区的大于低纬地区的,高原地区的大于平原地区的,南半球的大于北半球的。造成这种分布现象与卫星观测视角和预报误差有关。

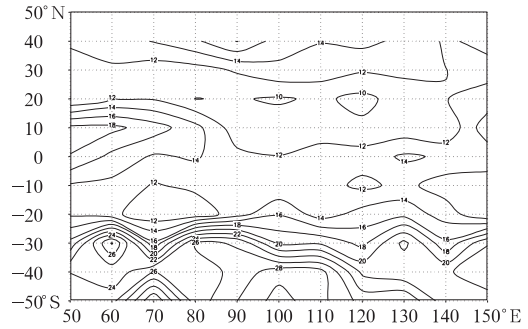


图 6 250~200hPa FY-2C 云导全风速平均偏差分布图

从另一角度分析,FY-2C 卫星云导风覆盖范围广、密度高、风场环流基本正确。若对云顶高度的确定、质量控制和同化技术方面作进一步应用研究,对资料同化系统应该发挥一定贡献的。

3 结 语

通过观测误差均方差分析,得出以下结论:

(1) 59 型探空温度观测误差在对流层以上明显偏大。在 50hPa 以上比其他探空约大 0.4℃ 以上。这说明在高层 59 型探空温度资料观测精度较差。

卫星反演温度的观测误差标准差在底层明显偏大,在 850~500hPa 偏大 0.5℃ 以上。

(2) 59 型探空仪和地面观测的相对湿度 IV 标准差比其它探空资料相对湿度 IV 标准差约小 10%。其他探空相对湿度的 IV 标准差比较一致。

(3) 对于 FY-2C 卫星云导风观测误差标准差,在 700hPa 以上,随高度异常地快速增加,400hPa 以上达到 10~14m·s⁻¹。其水平分布与卫星观测视角和预报误差有关,在星下点附近较小,高纬地区的大于低纬地区的,南半球的大于北半球的。

其它各种风的观测误差标准差基本相

当。在 300~200hPa 之间,约 $4\sim 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,其他层次约 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。

(4) 中国区域 L 波段和 59 型探空温度的正平均偏差明显,其原因可能是在探空气球上升过程中温度探测仪或多或少存在滞后现象、太阳辐射及订正方法和力度不足等的影响。

(5) L 波段探空湿度系统性偏小,随高度增加负偏差逐渐明显,200hPa 达到最大-28%。其原因有待有关专家进一步分析。

参考文献

- [1] Daley, R. Atmospheric Data Analysis[M]. Cambridge University Press, 1991, 457.
- [2] Hollingsworth, A., and P. Lonnberg. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data, Part I: the wind field[J]. Tellus, 1986, 38A:111-130.
- [3] Lonnberg, P., A. Hollingsworth. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data, Part II: the covariance of height and wind error[J]. Tellus, 1986, 38A: 137-161.
- [4] Gandin, L. S. Objective Analysis of Meteorological Fields (in Russian)[M]. Israel Program for Scientific Translation, 1965, 242.
- [5] Dee, D. P., A. M. da Silva. Maximum-likelihood estimation of forecast and observation error covariance parameters Part I: Methodology [J]. Monthly Weather Review, 1999, 127:1822-1834.
- [6] Xu, Qin, Li Wei., A. Van Tuyl et al. Estimation of Three-Dimensional Error Covariances Part I: Analysis of Height Innovation Vectors[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(8):2126-2135.
- [7] Xu, Qin Li Wei. Estimation of three-dimensional error covariances. Part II: Analysis of wind innovation vectors[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(12):2939-2954.
- [8] 龚建东,魏丽,陶士伟.全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用 I:观测空间协方差的准确估计[J].大气科学,2006,64(6):669-682.
- [9] 陶士伟,张跃堂,陈卫红,等.全球观测资料质量监视评估[J].气象,2006,32(6):61-66.