

利用 NOAA-9 气象卫星测值反演 大气温度垂直分布

董超华 张凤英

(国家气象局卫星气象中心)

摘要——主要介绍从 NOAA-9 卫星实测的辐射率资料反演大气温度垂直分布的方法和过程, 以及按地理区域和气压高度对反演结果进行地面真实性检验。结果表明: 在中、低纬度地区反演精度一般约为 2.3°C (RMS), 在较高纬度地区精度约为 3.0°C (RMS)。最大偏差主要发生在近地面大气层、对流层顶附近和地形复杂的陆地区域。

一、引 言

建立在北京地区的高分辨率图片传输(HRPT)地面接收站, 可以实时接收和处理美国 NOAA 系列卫星 AVHRR(改进的甚高分辨率辐射仪)和 TOVS(泰罗斯业务垂直探测器)的 HRPT 资料。本文主要介绍利用卫星红外和微波辐射计的 TOVS 测值反演大气温度垂直廓线的统计回归和与之相联系的匹配算法所构成的反演程序, 并对北纬 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 地区连续三天的温度反演廓线作了地面真实性检验和初步分析。

二、反 演 过 程

将一个描写无散射、处于局地热平衡的大气温度遥感方程写成

$$I(\nu) = B[\nu, T(p_s)]\tau(\nu, p_s) - \int_0^{p_s} B[\nu, T(p)] \frac{d\tau(\nu, p)}{dp} dp; \quad (1)$$

式中, ν 为波数, $B[\nu, T(p)]$ 为普朗克函数; $\tau(\nu, p)$ 表示在选定的波数 ν 从气压 p 到大气层顶($p=0$)之间的透过率; 而 $d\tau(\nu, p)/dp$ 则称为权重函数(或核函数); p_s 表示大气的最下层(地面层)。式(1)反映了地球大气温度分布和热辐射测值 $I(\nu)$ 之间的联系。它的右端第一项表示由地面发射并经过大气吸收衰减后到达卫星的辐射; 第二项表示发自大气本身而又被核函数作用后到达卫星的辐射。

为了建立卫星辐射率测值和大气温度廓线之间的统计关系, 需将温度和辐射率分别按特征向量展开, 其矩阵形式是:

$$T = AT^*; \quad (2)$$

$$R = BR^*; \quad (3)$$

式中, T 和 R 分别为大气温度和辐射率与样本平均值的偏差向量; T^* 和 R^* 分别为相应的经验正交函数特征向量。 T^* 由一组无线电探空温度统计样本得到; R^* 由一组辐射率样本统计得到; A 和 B 表示相应的展开系数矩阵。

对式(2)和式(3)进行矩阵运算得到:

$$T = RD; \quad (4)$$

其中

$$D = (R^*)^t S_B^{-1} S_{BA} T^*; \quad (5)$$

式中, S_B 为展开系数 B 的协方差矩阵, S_{BA} 为展开系数 B 和 A 的协方差矩阵, t 表示向量的转置, 上角标“ -1 ”表示逆矩阵。

我们认为由 Smith 和 Woolf^[1] 发展的特征向量法具有的优点是: 按其所用的参数数目在统计意义上最佳; 能够抑制卫星测值中随机噪声的传播以及在计算过程中所需计算机时间和数据存储空间较少。

回归反演解的关键是确定回归系数, 它依赖于统计样本的特点, 反映了气候平均温度场和卫星辐射测值光谱性质之间的相关性程度。而统计样本合理的时空匹配是温度和辐射测值光谱特性之间相关性可信度的基本保证。

为确定回归系数, 我们把卫星接收范围按纬度划分成: $70 \sim 60^\circ \text{N}$, $60 \sim 30^\circ \text{N}$ 和 $30 \sim 10^\circ \text{N}$ 三个带。在每个带内, 以卫星观测时间和地理位置(经、纬度)为基准, 寻找在时间上相差 $\pm 6 \text{h}$, 空间格距为 100km 的常规资料点。这个过程称做两种探测资料的时、空匹配。为了保证回归系数的质量, 必须对匹配样本进行严格的质量检验和筛选。再将各带中统计样本随机划分成独立样本集和相关样本集两类。最后利用相关样本集计算各个纬带的回归系数, 再用独立样本集检验回归系数的精度。据此, 我们选用 NOAA-9 TOVS^[2] 20 个红外通道和 4 个微波通道的辐射测值进行大气温度垂直分布反演。值得指出的是, 在大气温度反演中, 对于低层(20 层)和高层(20 层), 使用不同的回归系数。主要差别是, 计算回归系数时选的预估因子(光谱通道辐射率或通道亮温)不同。对于较低的 20 层(115、135、150、200、250、300、350、400、430、475、500、570、620、670、700、780、850、920、950 和 1000hPa) 大气温度反演, 我们选用 17 个 HIRS/2(高分辨红外探测器, 二型)红外通道和 3 个 MSU(微波探测器)通道的辐射率作为预估因子。然后利用式(5)计算回归系数 D 。

对于较高的 20 层(0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2、3、4、5、7、10、15、20、25、30、50、60、70、85 和 100hPa) 大气温度反演, 我们选用能量峰值贡献较高的几个仪器通道, 例如 HIRS/2 通道 1~3 和 17、MSU 通道 3~4 和 SSU(平流层探测器)通道 1~3 的辐射率预估因子计算回归系数。回归系数的计算过程同较低的 20 层。

所有参加特征向量回归系数计算的仪器通道辐射率, 我们都事先对其进行了各种类型的误差订正处理, 包括云污染订正^[3]。

由于季节的变化, 不能期待计算一次回归系数就能永久地预估大气温度分布。因此, 我们是从 14 天的统计样本中计算回归系数, 之后, 每补充一周的卫星测值和探空匹配样本都要重新计算一次系数。

三、结果分析

我们使用特征向量法对 1986 年 8 月 12 日至 14 日连续三天的 NOAA-9 卫星测值进行了温度廓线反演, 并将反演结果和相应时间的地面和探空观测 (RAOB) 资料进行空间匹配和统计分析。图 1 示出了北纬五个子纬度区卫星反演温度均方根误差 (RMS) 随高度的分布情况。由图 1 可见, 卫星反演的温度与探空观测值相比, 其均方根误差随纬度增加而有所增大; 从子纬度区 (1) 到 (3), RMS 约为 2.3°C , 对于子纬度区 (4) 和 (5), RMS 约为 3.0°C 。对 (1) 到 (3) 三个子纬度区, 在 200 hPa 以下的温度反演精度明显优于 (4) 和 (5) 两个子纬度区。我们又对五个子纬度区按气压层做了误差平均计算, 发现最大偏差产生在 1000、850、250 和 70 hPa 气压层。这说明地表面特性、水平和垂直温度梯度以及地形都对温度反演精度有较大影响。

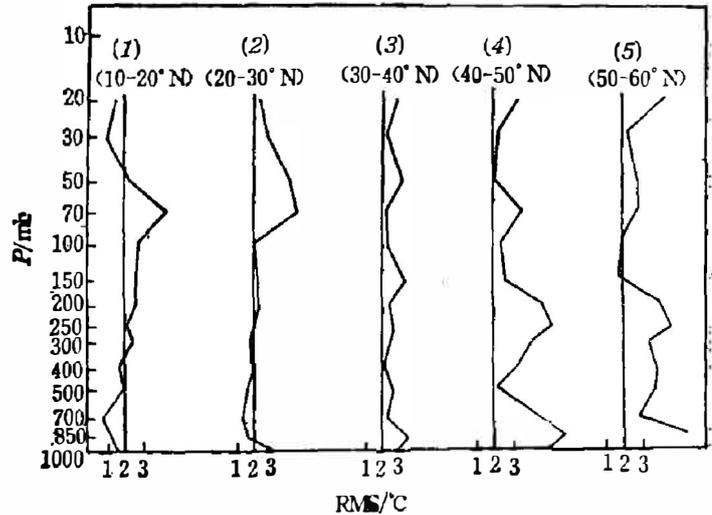


图 1 1986 年 8 月 12~14 日 TOVS/NOAA-9 在五个子纬度区温度反演的均方根误差 (RMS)

Fig. 1 The rms difference between the derived TO VS/NOAA-9 soundings and radiosondes in five sub-latitude zones, August 12~14, 1986.

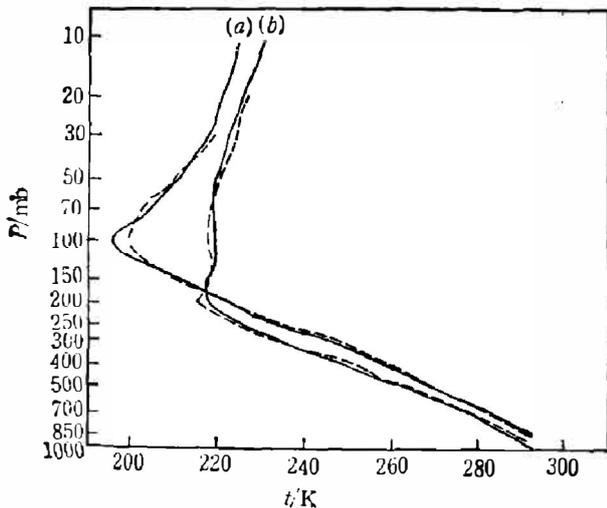


图 2. 1986 年 8 月 24 日 21 时 (GMT) 反演的温度廓线和 25 日 00 时 (GMT) 探空实况
(a) 河池 (b) 阿勒泰

Fig 2 Comparison of the NOAA-9-retrieved data (24/2100 GMT) and nearby radiosondes in August 1986.

(a) RAOB, 24.69°N , 108.04°E 25/0000 GMT
(b) RAOB, 47.72°N , 88.07°E 25/0000 GMT

图 2 a、b 分别示出了 1986 年 8 月 24 日 21 时河池 (24.69°N , 108.04°E , 海拔高度 214 m) 和阿泰勒 (47.72°N , 88.07°E , 海拔高度 737 m) 两个单站卫星温度反演与探空廓线 (1986 年 8 月 25 日 00 时) 的比较。可以看出, 除 850、200 和 100 hPa 气压层外, 由两种途径得到的温度廓线基本一致。同时由于阿勒泰海拔高度比河池高, 因此在 850 hPa 反演误差也明显大于河池站。

为了进一步探索垂直探测反演结果的实用价值, 我们还做了天气个例的初步分析工作。图 3 是 1986 年 8 月 5 日 05 时由 NOAA-9 反演结果得到的 500 hPa 等值线图, 纬度范围为 $25^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, 经度范围为 $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ 。图中虚线为温度, 实线为位势高度, 在图上还示出由反演结果推算的风矢量场。图 4 是同年 8 月 5 日 00 时对应

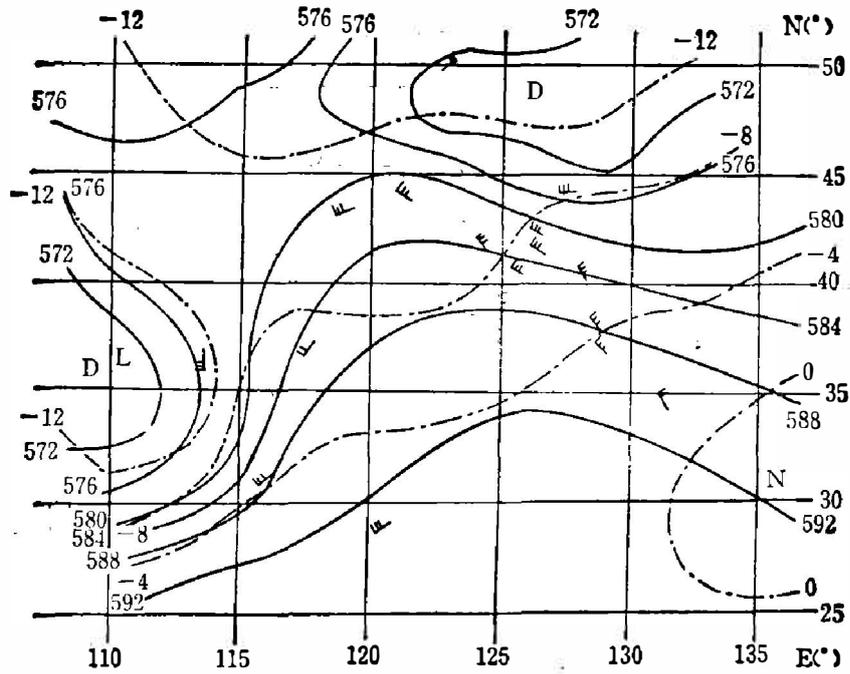


图3 1986年8月5日05时(GMT)500 hPa 温度(虚线)和位势高度(实线)反演等值线图
 Fig. 3 500 hPa temperature and geopotential height analysis from the NOAA-9, August 5, 0500 GMT, 1986.

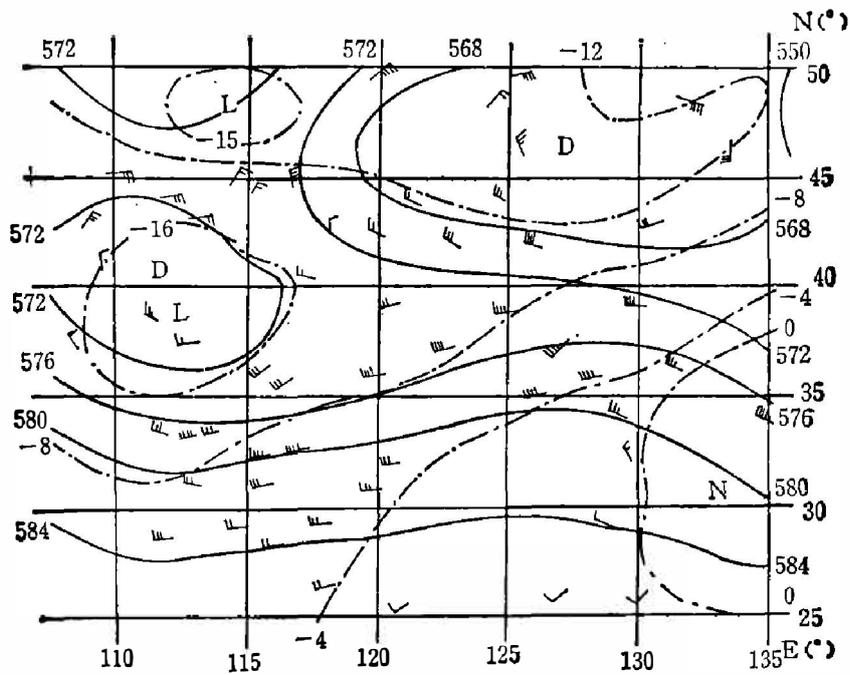


图4 1986年8月5日00时(GMT)500 hPa 天气图
 Fig. 4. As in Fig. 3 except for the conventional data analysis, August 5, 0000 GMT, 1986.

场天气系统结构与天气系统实况相似;比较客观地反映了探空温度场及位势高度场的分布情况,反演推导的地转风矢量场也和天气系统流场一致;只是反演的高压脊的强度比实况偏强,另外,在图3西部槽前脊后个别反演点上的风速偏大。

四、结 语

计算结果表明,由气象卫星资料反演的大气温度参数能够揭示大气温度的垂直分布。对于中低纬地区,在晴朗天气条件下,温度反演结果比较满意;而在较高纬度,尤其是地形较复杂的陆地区域,反演结果偏差较大。最大偏差发生在近地面和对流层顶附近,其主要原因是,较高纬度的下垫面多半是陆地,地面辐射特性比较复杂,同时较高纬度地区温度水平梯度比低纬度大,这给反演带来一定的困难。如果在陆地和地形复杂地区采用求解辐射传递方程的物理方法,并适当考虑地形对辐射测值影响的订正,以及消除权重函数对反演结果产生的系统偏差的影响^[4],将会对反演结果有所改善。

参 考 文 献

- [1] Smith W. L. and Woolf H. M., *J. Atmos. Sci.*, **33**(1976), 1127.
- [2] Smith W. L. et al., *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **60**(1979), 1177~1187.
- [3] Millin L. M. and Dean C., *Appl. Opt.*, **21**(1982), 1005~1014.
- [4] 黎光清、董超华, *气象*, **12**(1986), 11:26~29.

RETRIEVAL OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE STRUCTURE FROM THE NOAA-9 SATELLITE

DONG CHAOHUA, ZHANG FENGYING

(Satellite Meteorological Center, SMA)

ABSTRACT

In this paper a statistical regression with the matching algorithm has been described to get the retrieval of atmospheric temperature structure from the NOAA-9 satellite. The calculated temperatures are verified by comparison with radiosondes over the China region. The study shows that the root-mean-square (rms) difference is about 2.3°C over the middle and low latitude area and about 3.0°C over the higher, latitude area. The largest differences are near the ground and in tropopause region, particularly over the land with complicated topography.