

一种新的 TOVS 大气湿度反演方法及试验*

张凤英 王超 冉茂农 胡筱欣

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

提 要

利用国家气象中心的数值天气预报(NWP) 6 h 预报场, 作为同步物理反演模式初估场, 由气象卫星垂直探测(TOVS) 资料推导出大气湿度, 并给出了试验结果. 结果表明, TOVS 湿度反演的相对误差(RMS) 约为 20%. 其中, 夏季反演结果略优于冬季, 而且低层(1000 hPa) 和高层(500 hPa 以上) 与初估场相比有较大改进, 中层(850, 700 hPa) 二者大致相当. 与统计回归反演结果相比其精度约提高 10%. 该研究为在我国建立“卫星反演/数据同化/数值预报”相互影响的循环系统奠定了基础.

关键词: TOVS 大气湿度 同步物理反演 初估场

引 言

利用气象卫星垂直探测器(TOVS) 资料反演大气湿度是非常困难的, 因为湿度信息和温度信息交织混杂在多个 TOVS 探测通道中. 为了解决这个问题, Smith 提出了联立求解大气温度和湿度的同步物理反演方法^[1], 并进一步发展为联立求解大气温度、湿度及其它微量气体浓度(如臭氧等) 的多参数线性同步物理反演法^[2]. 初估场的选择对于物理反演模式至关重要. 过去, 初估场一般选用气候资料、回归法反演结果等作为辅助资料. 近几年来, 随着数值天气预报(NWP) 水平的不断提高, 卫星反演和数值预报专家们认为 NWP 模式同化过程中的 6 h 预报场可为卫星反演模式提供精度较高的初估场^[3]. 在“八五”课题的支持下, 我们开展了以国家气象中心(NMC) 的 NWP 6 h 预报场为同步物理反演模式初估场的 TOVS 大气湿度反演方法研究, 取得了初步试验结果.

1 TOVS 大气湿度反演方案

TOVS 主要由高分辨率红外辐射探测器(HIRS) 和微波探测器(MSU) 组成. 表 1 给出了 TOVS 光谱通道特征及其主要探测目的. 利用 TOVS 资料反演大气湿度的方案包括同步物理反演模式、初估值的确定、云污染的处理、基底函数的选择等.

* 本研究得到 85-906-01-04 项目资助.
1996-03-15 收到, 1996-07-25 收到修改稿.

表1 TOVS探测通道特征及其主要探测目的

Table 1 TOVS sounding channel characteristics and major sounding purposes

HIRS	中心频率 (cm ⁻¹)	中心波长 (μm)	主要吸收成分	峰值能量贡献层 (hPa)	主要探测目的
1	668	15.00	CO ₂	30	温度探测: 15.0 μm 带
2	679	11.70	CO ₂	60	通道比 1.3 μm 带通道
3	691	14.50	CO ₂	100	对大气冷区的温度探
4	704	14.20	CO ₂	400	测灵敏度更高, 通道 5,
5	716	14.00	CO ₂	600	6, 7 也用于推导云参
6	732	13.70	CO ₂ /H ₂ O	800	数
7	748	13.40	CO ₂ /H ₂ O	900	
8	898	11.10	窗区	地表	地面温度和云检测
9	1028	9.70	O ₃	25	臭氧总含量
10	1217	8.30	H ₂ O	900	水汽探测; 并用于 CO ₂
11	1364	7.30	H ₂ O	700	和窗区通道的水汽订
12	1484	6.70	H ₂ O	500	正
13	2190	4.57	N ₂ O	1000	温度探测: 4.3 μm 带
14	2213	4.52	N ₂ O	950	通道比 15.0 μm 带通
15	2240	4.46	CO ₂ /N ₂ O	700	道对大气暖区的温度
16	2276	4.40	CO ₂ /N ₂ O	400	探测灵敏度更高
17	2361	4.24	CO ₂	5	
18	2512	4.00	窗区	地表	地面温度和云检测
19	2671	3.70	窗区	地表	地面温度和云检测
20	14367	0.70	窗区	云	云检测

MSU	中心频率 (GHz)	主要吸收成分	峰值能量贡献层 (hPa)	主要探测目的
1	50.31	窗区	地表	温度探测: 微波通道能穿透云, 可
2	53.37	O ₂	700	用来减轻云对 4.3 μm 和 15.0 μm
3	54.96	O ₂	300	探测通道的影响
4	57.95	O ₂	90	

1.1 同步物理反演模式

为了实现联立求解大气温度、湿度和其它气体浓度(如 O₃)，Smith 把辐射传输方程(RTE) 变为包含温度、湿度和其它吸收气体分量的扰动方程。经过分部积分、一阶 Taylor 近似展开等一系列变换，多参数线性同步物理反演模式的 RTE 可表示为：

$$\delta T_b = \beta^n(p_s) \tau^n(p_s) \delta T_s - \sum_{n=1}^N \int_0^{p_s} \beta^n(p) \tau^n(p) \delta T_n(p) d \ln \tau_n^n(p) \quad (1)$$

其中

$$\delta T_n(p) = \delta T(p) - \delta U_n(p) [dT(p)/dU_n^n(p)] \quad (1a)$$

$$\beta^n(p) = [\partial B(T^n)/\partial T] / [\partial B(T^n)/\partial T] \quad (1b)$$

式中, T_b 和 T_s 分别表示卫星观测的和由初估大气廓线通过辐射传输模式计算的 TOVS 通道亮温; $T(p)$ 和 $T^n(p)$ 分别表示待求的和初估大气温度, $U_n(p)$ 和 $U_n^n(p)$ 分别表示待求的和初估吸收气体 n 的浓度; $T_n(p)$ 表示吸收气体 n 的温度; $\tau_n(p)$ 表示从大气层顶到气压层 p 吸收气体 n 的透过率, τ 表示大气总透过率 ($\tau = \prod \tau_n$); $B(T)$ 表示温度为 T 的

Planck 辐射率. N 表示吸收气体数目. 本研究取 $N=2$, 其中 $n=1$ 为大气湿度反演, $n=2$ 为大气温度反演. 下标“s”表示地面, 上标“0”表示初估值. δ 表示待求参数与初估参数之差. 式中变量 T_s , τ , β 均是通道频率 ν 的函数.

由一组 TOVS 通道亮温求解大气湿度 $U_w(p)$ 必须包括下面三个步骤:

(1) 给定一组 k 个 TOVS 通道亮温 $T_b(j)$ ($j=1, 2, \dots, k$) 及初估大气温度 $T^0(p)$ 和吸收气体浓度 $U_n^0(p)$ 廓线, 通过求解式(1) 求出 $\delta T_n(p)$.

(2) 令 $T(p) = T^0(p) + \delta T_d(p)$, 其中下标“d”表示其浓度和大气透过率廓线已知的吸收气体. 由于 CO_2 浓度在大气中基本不变, 故在实际资料处理过程中把 CO_2 作为已知吸收气体.

(3) 利用式(1a) 求出大气湿度廓线 $U_w(p)$, 即

$$U_w(p) = U_w^0(p) + [dU_w^0(p)/dT(p)][T(p) - T_w(p)] \quad (2)$$

其中, 下标“w”表示湿空气(H_2O).

为便于对一组 k 个 TOVS(HIRS1~16+MSU2~4) 通道亮温由式(1) 求解 $\delta T_n(p)$, 将 $\delta T_n(p)$ 表示为某种依赖于气压 p 的基底函数 $\phi_i(p)$, 即

$$\delta T_n(p) = - \sum_{i=1}^M \alpha_i \phi_i(p) \quad (3)$$

将式(3) 代入式(1), 并写成矩阵形式

$$t_b = \Phi A \quad (4)$$

式(4) 的最小二乘解是

$$A = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T t_b \approx (\Phi^T \Phi + \gamma I)^{-1} t_b \quad (5)$$

式中 A 是 $M+1$ 维系数向量, t_b 是 K 维亮温偏差向量, 上标“T”和“-1”分别表示矩阵转置和求逆. 其中 γI 是为稳定矩阵求逆而插入的, γ 是尺度因子(一般取 $\gamma=0.1$), I 是单位矩阵. 矩阵 Φ ($[K \times M+1]$ 维) 是由初估解计算而来的, 其元素是

$$\Phi_{n,j} = \beta_j^0(p_s) \tau_j^0(p_s) \quad (6a)$$

$$\Phi_{i,j} = - \int_0^{p_s} \phi_i(p) \beta_j^0(p) \tau_j^0(p) d \ln \tau_{n_j}^0(p) \quad (1 \leq i \leq M) \quad (6b)$$

上式中, M 表示反演大气湿度和温度所选取的基底函数的数目, 本研究取 $M=9$, 当 ($1 \leq i \leq 3$) 时为湿度反演, 当 ($4 \leq i \leq 9$) 时为温度反演.

基底函数 $\phi_i(p)$ 的选择是任意的. 我们选用包含光谱通道物理信息的辐射传递方程的权重函数作为基底函数 ($\phi_i(p) = d\tau_i / d \ln p$).

式(6a) 适用于地面温度反演. 式(6b) 既适用于大气湿度反演, 也适用于大气温度及其它吸收气体浓度反演. 一旦系数 A 确定之后, 利用上述反演模式便可确定最终反演解. 由于使用一组 ($k=19$) 个 TOVS 通道亮温反演大气湿度和温度, 所以反演解是稳定的.

透过率 τ 的计算采用 Weinreb 等研制的快速透过率计算方法^[4]. 该方法可分别计算 HIRS 和 MSU 通道的 CO_2 、 H_2O 、 O_3 、 O_2 等吸收气体的 40 个 TOVS 气压层 (0.1~1000 hPa) 的透过率(见表 2). 需要说明的是本模式只适用于晴空大气.

表2 TOVS 物理反演模式中使用的40个气压层

Table 2 40 pressure levels used in the TOVS Physical Retrieval Method (SPRM)

层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)
1	0.1	11	10 *	21	115	31	500 *
2	0.2	12	15	22	135	32	570
3	0.5	13	20 *	23	150 *	33	620
4	1.0	14	25	24	200 *	34	670
5	1.5	15	30 *	25	250 *	35	700 *
6	2.0	16	50 *	26	300 *	36	780
7	3.0	17	60	27	350	37	850 *
8	4.0	18	70 *	28	400 *	38	920
9	5.0	19	85	29	430	39	950
10	7.0	20	100 *	30	475	40	1000 *

注: * 表示该层为标准层

1.2 初估值的确定

我们选择 NWP 6 h 预报场作初估场构造反演模式的初估值. NWP 6 h 预报场取自 NMC 的 T42 全球模式或有限区模式输出的温度和湿度场. T42 模式的水平方向格距为 2.5° , 垂直方向温度场从 50~1000 hPa 分 12 个标准层, 湿度场从 300~1000 hPa 分 6 个标准层^[6]. 有限区模式水平方向格距为 1° , 垂直方向为 15 个 σ 坐标层^[7]. 然而, 同步物理反演模式要求 40 个 TOVS 气压层, 因此, 需要补充其它辅助资料方可构造完整的初估大气廓线. 下面两种资料可作为辅助资料:

(1) 气候资料: 1 月份和 7 月份 5 个纬度带 (15°N , 30°N , 45°N , 60°N , 75°N) 的 10 条气候廓线. 每条廓线包括由 40 个 TOVS 气压层构成的温度、湿度廓线及地面温度和湿度.

(2) 回归法反演结果: 利用给定的回归系数由基本不受云影响的 TOVS 平流层探测通道 (HIRS1~3, MSU2~4) 亮温反演出初始大气廓线.

对于给定的 TOVS 探测点的时间、位置和一组 k 个通道亮温, 利用 NWP 6 h 预报场和辅助资料构造一条完整的大气廓线需要下列步骤来实现:

(1) 利用辅助资料构造初始大气廓线 (0.1~1000 hPa): 由给定的 10 条气候廓线采用时间和空间的双线性插值法求出探测点的初始大气廓线, 或直接利用回归法反演结果.

(2) 利用 NWP 预报场构造初始大气廓线 (50~1000 hPa): 根据卫星观测点的位置, 将预报场水平插值到卫星探测点上, 垂直插值到 40 个 TOVS 气压层上. ① 水平插值: 利用拉格朗日插值公式, 由 16 点内插求出由 12 个标准层组成的基准初始大气廓线. ② 垂直插值: 采用对数坐标的 4 点垂直插值公式, 将基准初始大气廓线垂直插值到相应的 25 个 TOVS 气压层上, 构成一条初始大气廓线.

(3) 将(1)(2)步骤的初始廓线拟合成一条完整的初估大气廓线 (0.1~1000 hPa), 其下层 (50~1000 hPa) 采用廓线(2), 上层 (0.1~50 hPa) 采用廓线(1).

1.3 云污染的处理

在 TOVS 资料处理中, 大气参数是采用 3×3 个 HIRS 视场构成的反演块 (BOX) 推

导出来的. 其中, MSU 通道测值已插值到每个 HIRS 探测点上. 对于每个 BOX, 晴空点定义为 $11 \mu\text{m}$ 窗区通道辐射值与局地最大辐射测值之差在 $2k$ 以内的点. 对所有晴空点的辐射测值求平均便得到一个 BOX 的“晴空”辐射值. 可见光通道反射率 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 窗区通道亮温与由 NWP 预报场得到的地面温度一起用来判断“晴空”辐射测值是否受云的污染.

如果观测视场的辐射测值受云污染, 则利用 Menzel 等发展的云参数计算方法由 HIRS $15 \mu\text{m}$ CO_2 带相邻两个光谱通道的辐射测值推导出云高 P_c 、云顶温度 $T(P_c)$ 及云量 N . 通过对云层以下初估湿度廓线的调整及红外通道亮温的修正, 可消除云对红外通道测值的影响^[5].

1.3.1 湿度初估廓线的调整

一旦给定 P_c , $T(P_c)$ 和 N , 便可对湿度初估廓线进行调整. 假如在云顶高度 P_c 处的水汽混合比为 $W(P_c)$, 则

$$W(P_c) = N W_{\text{SAT}}[T(P_c)] + (1 - N) W^0(P_c) \quad (7)$$

式中, W_{SAT} 是与 $T(P_c)$ 对应的饱和水汽混合比, $W^0(P_c)$ 是原初估水汽混合比. 在云层以下, 利用原地面水汽混合比插值求出新的初估水汽混合比廓线.

1.3.2 红外通道亮温的修正

一旦确定了云参数和初估水汽混合比廓线, 便可计算出偏离初估状态的亮温偏差 δT_b , 其中包含了云对 HIRS 视场的影响. 在求解式(1) 时, 通过假定

$$\tau = (1 - N) \tau^0 \quad (8)$$

便可把云的影响包含进去. 其中 τ^0 是由初估温度和湿度廓线计算的原透过率. 通过对透过率的修正, 可减少受云污染的红外光谱通道测值对反演解的影响.

1.4 基底函数的选择

基底函数的选择对于同步物理反演方法十分重要. 试验选择 6 个通道(HIRS 1、3、7 和 MSU 2、3、4) 的权重函数作为反演干空气温度 $\delta T_d(p)$ 的基底函数($\phi_d(p) = d\tau_d/d\ln p$); 选择 3 个通道(HIRS 12、7、6) 的权重函数作为反演湿空气温度 $\delta T_w(p)$ 的基底函数.

1.5 大气湿度反演过程

对于给定的每个反演点(BOX) 的位置、时间和通道亮温, 利用同步物理反演模式反演大气湿度, 需要下面三个过程来完成:

(1) 利用 1.2 节介绍的方法确定探测点的初估值, 其中包括大气温度 $T^0(p)$ 、大气湿度 $U_w^0(p)$ 及地面温度 T_s^0 , 同时还需给出 CO_2 、 O_3 的含量.

(2) 利用 1.3 节介绍的方法消除云对 HIRS 通道测值的影响, 计算出探测点的晴空辐射值, 并采用 HIRS 通道 5 和 7 计算出云参数.

(3) 利用 1.1 节介绍的模式及 1.4 节确定的基底函数, 首先利用初估值计算出系数矩阵 A , 然后分别计算干空气温度偏差 $\delta T_d(p)$, 湿空气温度偏差 $\delta T_w(p)$ 及地面温度偏差 δT_s , 进而计算出干空气温度 $T_d(p)$ 和湿空气温度 $T_w(p)$. 最后推导出大气湿度廓线 $U_w(p)$.

2 试验结果与误差分析

试验采用国家卫星气象中心(NSMC) TOVS 业务系统预处理后的中间结果^[8]. 我们曾利用文献[1]介绍的同步物理反演模式和 NOAA-11 TOVS 资料进行反演大气温度和湿度廓线试验, 其初估场分别选择: ① 气候资料, ② 回归法反演结果, ③ NWP T42 6 h 预报场. 试验结果表明, 以 NWP 6 h 预报场为初估场的反演结果明显优于其它两种, 从而证实了利用 NWP 6 h 时预报场构造反演模式初估值的可行性^[9]. 下面给出的试验结果是采用本文介绍的方法由 NOAA-12 TOVS 资料反演的大气湿度廓线与常规探测资料的对比分析. 反演湿度场的水平分辨率约为 75 km. 同时, 我们还对大气湿度反演误差进行了初步的分析, 并开展了 TOVS 湿度反演误差订正研究^[10]及 TOVS 湿度反演结果对 NWP 影响的试验研究^[11].

2.1 试验使用的资料

试验采用了冬季和夏季两个时段的资料, 即

(1) 1992 年 1 月份 NOAA-12 每天夜间 3 条轨道的 TOVS 资料, 其过境时间大约在 0950UTC、1130UTC 和 1310UTC 左右, 其覆盖范围大约为 $145^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$, $65^{\circ}\text{N}\sim 0^{\circ}$, 恰好覆盖了我国东部平原, 西部高原, 中间过渡地带三种地形. 此外还有用于初估场的与 TOVS 资料相应的 NWP T42 1200UTC 6 h 预报场以及用于对比分析的相应时间的常规观测(RAOB) 资料.

(2) 1996 年 6 月份 NOAA-12 每天 6 条轨道的 TOVS 资料, 其中夜间 3 条轨道的过境时间同(1), 白天 3 条轨道的过境时间大约在 2230UTC、0030UTC 和 0230UTC 左右, 其覆盖范围与夜间 3 条轨道大致相当. 此外还有用于初估场的与 TOVS 资料相应的 NWP 有限区 0000UTC 和 1200UTC 6 h 预报场以及用于对比分析的相应时间的常规观测(RAOB) 资料.

2.2 试验结果

表 3 给出了 1992 年 1 月份和 1996 年 6 月份 NOAA-12 TOVS 同步物理反演结果 (SPRM)、初估值(GUESS) 与常规探测(RAOB) 相对湿度的比较结果. 其中 1992 年 1 月份是由 18 天每天 3 条轨道的资料统计得到的(因只有 18 天的 RAOB 资料), 表 1996 年 6 月份是由 15 天(6~20 日) 每天 6 条轨道的资料统计得到的.

由表 3 可以看出, TOVS 物理反演相对湿度的平均相对误差(RMS) 约为 20%. 其中, 在近地面层(1000 hPa) 和高层(500 hPa 以上) 明显优于初估场, 而在中间层(850 hPa 和 700 hPa) 二者大致相当.

表 4 给出了 1992 年 1 月 6 日 3 条轨道的 TOVS 物理反演 (SPRM) 和回归反演 (REG) 与 RAOB 相对湿度的比较. 表 4 中回归反演采用的是 NSMC 的 TOVS 资料业务处理系统中的统计回归法. 由表 4 可以看出, 同步物理反演结果明显优于统计回归反演结果, 平均相对误差(RMS) 约提高 10%.

表 3 1992 年 1 月和 1996 年 6 月 NOAA-12 TOVS 同步物理反演 (SPRM)、
初估值 (GUESS) 与常规探测 (RAOB) 相对湿度 (%) 的比较
Table 3 The Comparisons of relative humidity (%) between NOAA-12 TOVS
physical retrieval (SPRM), first guess (GUESS) and radiosonde data
for January of 1992 and June of 1996

层次 (hPa)	SPRM-RAOB			GUESS-RAOB			
	<i>N</i>	<i>Bias</i>	<i>RMS</i>	<i>N</i>	<i>Bias</i>	<i>RMS</i>	
1992 年 1 月	300	2317	0.0	15.0	2317	-35.0	40.0
	400	2510	-1.0	19.0	2510	-22.0	29.0
	500	2750	-1.0	22.0	2750	-16.0	26.0
	700	2442	0.0	24.0	2442	-5.0	22.0
	850	1780	0.0	23.0	1780	-6.0	22.0
	1000	276	0.0	18.0	276	-13.0	20.0
1996 年 6 月	300	10270	0.0	17.0	10270	-7.0	27.0
	400	11066	-1.0	20.0	11066	-7.0	24.0
	500	11264	0.0	21.0	11264	-7.0	23.0
	700	10433	0.0	21.0	10433	-9.0	20.0
	850	8522	1.0	18.0	8552	-11.0	21.0
	1000	929	1.0	13.0	929	-24.0	27.0

(*N*: 样本数, *Bias*: 平均偏差, *RMS*: 均方根误差, 下同)

表 4 1992 年 1 月 6 日 NOAA-12 TOVS 同步物理反演 (SPRM)、回归反演 (REG)
与常规探测 (RAOB) 相对湿度 (%) 的比较 (TOVS-RAOB)

Table 4 The Comparisons of relative humidity (%) between NOAA-12
TOVS physical retrieval (SPRM), regression retrieval (REG) and
radiosonde data for January of 1992

层次 (hPa)	SPRM-RAOB			REG-RAOB		
	<i>N</i>	<i>Bias</i>	<i>RMS</i>	<i>N</i>	<i>Bias</i>	<i>RMS</i>
300	161	-5.9	22.0	117	10.5	32.6
400	174	-5.3	22.9	122	20.1	34.8
500	194	2.3	25.8	118	23.1	36.6
700	176	14.4	26.6	108	14.7	31.4
850	136	2.2	22.9	107	1.0	29.5
1000	83	-2.9	17.0	68	-3.3	24.3

需要说明的是, 表 3 给出的 SPRM 湿度反演结果已经过系统反演偏差 (*Bias*) 订正^[10], 而表 4 中的 SPRM 湿度反演结果未进行订正. 然而, 无论是经过订正的还是未经过订正的 SPRM 反演结果均明显优于统计回归反演结果, 而且在近地面层和高层较初估场均有较大的改进.

为了检验 SPRM 反演湿度场的水平分布是否合理, 我们对 1992 年 1 月 6 日 NOAA-12 TOVS/SPRM 反演与常规探测 (RAOB) 的 850 hPa 湿度场进行了分析 (见图 1). 就总体趋势而言, 二者基本一致, 尤其在 RAOB 资料密集的中国大陆地区. 然而在 RAOB 资

料缺乏的海洋和高原地区, 由于 TOVS 资料水平分辨率高(约 75 km), 覆盖均匀, 其分布似乎更合理.

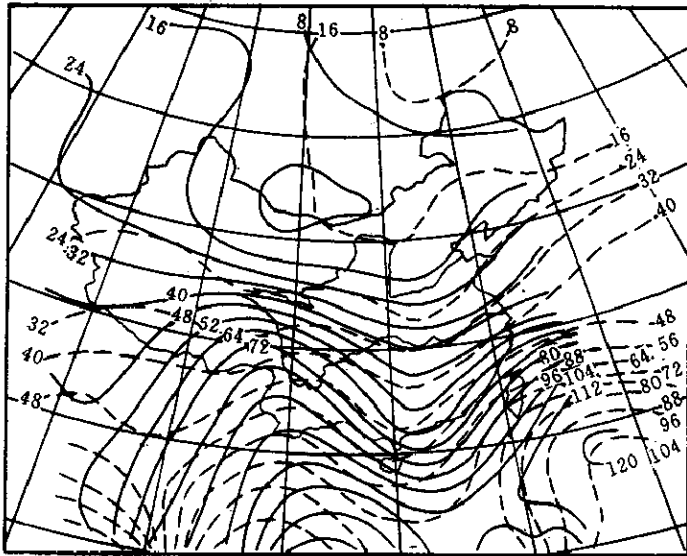


图1 1992年1月6日 NOAA-12 TOVS/SPRM 反演和常规探测(RAOB) 850 hPa 湿度场(单位: $\times 10$ g/kg) (实线: TOVS/SPRM 反演; 虚线: RAOB 探测)

Fig 1 The water vapor fields of TOVS/SPRM from NOAA-12 and RAOB at Jan. 6, 1992 (unit: $\times 10$ g/kg) (where sold line: TOVS/SPRM retrievals, dashed line: RAOB data)

此外, 我们还利用本文介绍的方法对 1992 年 8 月份 NOAA-11/12 TOVS 资料进行了处理, 并将反演结果用于“数据同化/数值预报”试验研究^[9]. 试验表明, TOVS 湿度反演结果对 NWP 预报有一定的正效应.

2.3 SPRM 湿度反演误差分析

造成 SPRM 湿度反演误差的原因是多方面的. 下面就几个主要原因分析如下:

(1) 仪器探测误差: 主要是由于探测仪器噪声及定标误差造成的(目前 TOVS 仪器的定标精度约 ± 1 K). 由于仪器探测误差难于精确测定, 即使在反演模式中考虑到仪器探测误差的影响, 也很难消除由其带来的反演误差.

(2) 探测信息不足: 目前 TOVS 探测器(HIRS) 在 $6.3\mu\text{m}$ 水汽吸收带只有 3 个通道(ch 10~12). 因此, 探测信息的不足给反演结果带来一定的误差.

(3) 透射率模式误差: 精确地大气透射率计算模式对于物理反演方法至关重要. 本研究采用的是一种快速透射率计算模式, 与精确透射率模式相比, 计算时间快, 但精度较低.

(4) 初始大气廓线误差: 初始大气廓线误差直接或间接通过大气透射率及亮度温度给反演结果带来一定的误差.

(5) 晴空辐射模式误差: 本文采用的反演模式是建立在晴空辐射值基础上的. 因此, 晴空辐射模式误差会直接影响反演结果.

(6) 反演模式误差：反演模式是建立在辐射传输方程基础上的。线性同步物理反演模式是通过一系列假定将非线性方程线性化推导出来的。因此，反演模式本身也给反演结果带来一定的误差。

综上所述，通过改进仪器探测精度、透射率模式、初始大气廓线精度及晴空辐射计算模式即可改进同步线性物理反演精度。

3 讨 论

利用 NWP 6 h 预报场作为卫星反演模式的初估场反演大气参数，进而把卫星反演结果用于数据同化/数值预报中去，然后再将 NWP 6 h 预报结果用于卫星反演模式，这种处理方案被称为“卫星反演/数据同化/数值预报”相互影响的循环系统。由于卫星反演、数据同化、数值预报之间的相互协调，故可达到既提高反演精度，又改进 NWP 预报水平之目的。因此，该方案是当前国际上普遍采用的卫星资料处理方案。目前，美国、欧洲等国家已将其投入业务应用。在我国，此类研究才刚刚开始。本文提出的方案是根据我国的具体情况而设计的。试验结果表明，该方案是切实可行的，并为在我国建立“卫星反演/数据同化/数值预报”相互影响的循环业务应用系统奠定了基础。

致谢：万丰同志为本研究提供了 NWP 6 h 预报场资料，在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Smith W L, Woolf H M, Hayden C M and Schreiner A J. The Simultaneous Retrieval Export Package, Technical Proceedings of the 2nd International TOVS Study Conference, 18~22, Feb., 1985, Igls, Austria, 224~253.
- 2 Smith W L, Woolf H M and Revercomb H E. Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra. *Applied Optics*, 1991, 30(9): 1117~1123.
- 3 Baker W E, Fleming H E, et al. Production and use of satellite soundings with an interactive Analysis/Forecast/Retrieval system. Technical Proceedings of the 5th International TOVS Study Conference. 24~28 July, 1989, Toulouse, France, 16~41.
- 4 Weinreb M P, Fleming H E, McMillin L M and Neuendorffer A C. Transmittances for the TIROS Operational Vertical Sounder. NOAA Technical Report NESS 85, 1981, 60.
- 5 Menzel W P, Wylie D P and Strabala K I. Characteristics of global cloud Cover derived from multispectral HIRS observations. Technical Proceedings of the 5th International TOVS Study Conference. 24~28 July, 1989, Toulouse, France, 276~290.
- 6 朱宗申, 石曙卫, 张跃堂. 国家气象中心全球资料四维同化试验. *应用气象学报*, 1992, 3(增刊): 33~40.
- 7 郭肖容, 郑国安, 朱宗申, 等. 一个有限区分析预报系统. 《中期数值天气预报研究》成果汇编(三). 北京: 气象出版社, 1991.
- 8 董超华, 张凤英, 郑波, 等. 卫星区域大气探测业务处理系统. *应用气象学报*, 1991, 2(1): 22~31.
- 9 王宗浩, 张凤英, 王子厚, 等. 数据同化/卫星反演/数值预报相互循环作用系统. *气象*, 1994, 20(10): 3~11.
- 10 王超, 张凤英. TOVS 水汽反演的误差分析及其订正. *应用气象学报*, 1996, 7(3): 285~293.
- 11 王超, 万丰, 张凤英, 等. 卫星反演/数据同化/数值预报相互影响试验研究(应用气象学报, 待发表).

A STUDY OF ATMOSPHERIC WATER VAPOUR RETRIEVAL APPROACH FROM TOVS OBSERVATIONS AND ITS EXPERIMENT

Zhang Fengying Wang Chao Ran Maonong Hu Xiaoxin
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

This paper presents a new approach for the satellite retrieval of atmospheric humidity from TIROS-N Operational Vertical Sounder (TOVS) observations with 6-hour numerical forecasts from the National Meteorological Center (NMC) as the first guess of the Simultaneous Physical Retrieval Model (SPRM). It is shown that the RMS error of SPRM retrievals is about 20%, and the results for the summer time is slightly better than those for the winter time. As compared to the first guess, the SPRM retrievals have greatly improved especially for the lower level (1000 hPa) and higher levels (above 500 hPa). Also, the SPRM results are much better (about 10%) than those from the statistic regression method. This research will lay the foundation for establishment of a cycle system of interaction among the satellite retrieval, data assimilation and numerical prediction.

Key words: TOVS observation Atmospheric water vapour Simultaneous physical retrieval method (SPRM) First guess