

文章编号:1001-9014(2005)04-0304-05

卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法

师春香^{1,2,3}, 谢正辉¹

(1. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029; 2. 中国气象局 国家卫星气象中心,北京 100081;
3. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:利用 GMS-5 多通道资料和 MODTRAN 辐射传输模式设计并实现了用卫星红外分裂窗通道反演大气可降水的物理反演算法. 采用 1998 年夏季的资料进行了大气可降水反演试验,并使用探空资料对反演结果进行检验,其均方根误差为 3.30mm. 为了在业务上实现大气可降水物理反演算法,设计了通过利用 GMS-5 资料、数值预报资料以及 RTTOV7 快速辐射传输模式的反演大气可降水的物理算法,并用探空资料对反演结果进行检验,其均方根误差为 4.09mm. 结果表明:RTTOV7 快速辐射传输模式的引入,使反演速度有显著的提高,能够满足业务要求.

关键词:大气可降水;卫星红外数据;MODTRAN;RTTOV7;辐射传输模式

中图分类号:P407 **文献标识码:**

OPERATIONAL METHOD OF TOTAL PRECIPITABLE WATER RETRIEVED FROM SATELLITE MULTI-CHANNELS' INFRARED DATA

SHI Chun-Xiang^{1,2,3}, XIE Zheng-Hui¹

(1. Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;
2. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China;
3. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A physical retrieval method of total precipitable water (TPW) by GMS-5 satellite infrared-split window channels and MODTRAN radiative transfer model was developed. TPW retrieval tests by using data of summer in 1998 were performed and the verification of retrieved results by using radiosonde data was given, whose RMSE was about 3.30mm. To apply a physical retrieval method operationally, a scheme different from one method above was designed, which was performed through GMS-5 multi-infrared channels' data and RTTOV7- a fast radiative transfer model, and whose RMSE was about 4.09mm. The results show that computation cost of the method for RTTOV7 is reduced greatly, which is satisfied for operation purpose.

Key words: TPW; satellite infrared data; MODTRAN, RTTOV7; radiative transfer model

引言

气象卫星发射以来,人们就致力于利用卫星资料获取大气中的水汽信息,包括水汽的垂直分布和水平分布以及随时间变化. 为了从遥感信息中获取大气可降水,国内外研究者开展了许多的方法研究,包括主动与被动的微波辐射计法、可见光和红外通道法等. 北京大学李万彪等人开展了红外资料反演大气可降水的研究^[1]. YAO Zhanyu 等人利用 GMS-5 卫星红外分裂窗和水汽通道资料,用统计反演方法反演得到晴

空大气可降水分布^[2]. 利用卫星红外辐射计获取大气可降水的主要探测资料是垂直业务探测器(TOVS)资料 and 分裂窗通道资料. 这里讨论利用卫星红外分裂窗通道资料反演大气可降水的方法.

最初用分裂窗资料估算大气可降水的方法,是在反演陆面温度和海面温度时,对辐射传输路径上水汽吸收订正的基础上发展起来的. Jedovec 最初尝试了用红外分裂窗资料反演大气可降水的物理反演方法,其后许多学者的研究对这一方法进行了完善和不断的改进^[3~6].

收稿日期:2004-06-08, 修回日期:2004-09-10

Received date: 2004-06-08, revised date: 2004-09-10

基金项目:973 中国暴雨研究(G1998040907)、国家重点基础研究发展规划项目(2001CB309404)以及国家自然科学基金项目(40275023)联合资助

作者简介:师春香(1964-),女,山西文水人,博士生,高级工程师,主要从事气象卫星遥感资料应用研究.

统计分裂窗法简单,有利于业务系统的稳定运行,但精度较差;物理分裂窗法精度优于统计方法,但第一:它需要相应的初估场(探空资料或数值预报资料),而且耗费资源大,因为每次都需要利用大气辐射传输模式计算透过率等参数,计算时间较长,因此在业务运行中使用时还有待于提高计算速度.而快速辐射传输模式的引入,使得大气可降水物理反演方法在业务上能够实现.

尽管大气可降水反演研究工作开展较早,但是,目前为止我国还没有基于静止卫星资料的大气可降水业务反演产品.本文引入了 MODTRAN 辐射传输模式,采用探空资料作为初估场,实现了 GMS-5 大气可降水红外分裂窗物理反演算法,进一步研究了将大气可降水物理反演方法在业务上得到应用,因此设计并实现了利用 GMS-5 卫星多通道资料、数值预报资料和 RTTOV7 快速辐射传输模式的大气可降水红外分裂窗物理反演模型,RTTOV7 快速辐射传输模式的引入,大大地提高了反演速度,从而使物理反演算法在业务得以实现.

1 反演方法

在有云情况下,卫星红外探测器测到的是云顶及以上大气发射的辐射,基本上不包括云中及其它的大气及地表的辐射(薄卷云例外),因此利用红外分裂窗反演大气可降水的方法只适合在晴空条件下使用.云检测是实现大气可降水反演的第一步.

云检测结果对大气可降水反演结果有重要的影响.如果云检测过于严格,将会把晴空像素认为是云,这样会丢掉许多有用的信息;反之如果云检测不够严格,将会把一些云像素或被云污染的像素作为晴空像素,这些像素会严重影响反演的精度.在很多相关的研究中都需要进行云检测,因此云检测有许多共性的问题和处理方法,但是在针对具体问题和不同的卫星资料时又有其特殊性.本文使用的云检测算法请参看文献[7].

分裂窗反演大气可降水的物理方法直接从大气辐射传输方程入手,利用数学上的小扰动理论,将辐射传输方程化为容易求解的线性方程,通过求解二元线性方程组,得到相对于初始值的偏移量.

假设平面平行大气在红外波长 λ 处的非散射传输方程可写为

$$I = \varepsilon B_{\lambda}(T_s)\tau_s + (1 - \varepsilon)\tau_s \int_0^{p_s} B_{\lambda}(T_p) \frac{d\tau}{dp} dp - \int_0^{p_s} B_{\lambda}(T_p) \frac{d\tau}{dp} dp. \quad (1)$$

其中: I 表示在大气层顶地气系统向外的红外辐射值,即卫星测得的辐射亮温; T 表示温度, ε 表示地表发射率, B_{λ} 表示在波长 λ 处的红外辐射, τ 表示大气透过率, P 表示气压,下标 s 表示地面, B 为 Planck 函数.

在红外波段地表发射率 $\varepsilon \approx 1$,式(1)变为

$$I = B_{\lambda}(T_s)\tau_s - \int_0^{p_s} B_{\lambda}(T_p) \frac{d\tau}{dp} dp. \quad (2)$$

经过一系列变换得到

$$\delta T_{\lambda} = \delta T_s \left\{ \tau_s \left[\frac{\partial B_{\lambda}(T_s)/\partial T_s}{\partial B_{\lambda}(T_s)/\partial T_s} \right] \right\} + \frac{\delta U}{U_0} \times \int_0^{p_s} U_0 \left\{ \left[\frac{\partial \tau}{\partial U} \right] \left[\frac{\partial B_{\lambda}(T_p)}{\partial T_p} \right]^{-1} \left[\frac{dB_{\lambda}(T_p)}{dp} \right] \right\} dp. \quad (3)$$

式(3)中 U_0 和 T_s 代表初始猜测的大气可降水和地表温度,未知数 δU 和 δT_s 分别是在 U_0 和 T_s 基础上扰动量.将上式分别应用于分裂窗通道 $11\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$,可得到:

$$\delta T_{11} = \delta T_s C_{11} + \delta U/U_0 D_{11}, \quad (4)$$

$$\delta T_{12} = \delta T_s C_{12} + \delta U/U_0 D_{12}. \quad (5)$$

在已知大气温度廓线、初始的地表温度 T_s 和大气可降水 U_0 的情况下,利用上面的公式可以求出系数 C 和 D ,然后计算两个通道的正演亮温和卫星实测亮温之差,求解式(4)和式(5)组成的方程组,可以求得未知量 δU 和 δT_s ,最后得到

$$U = U_0 + \delta U. \quad (6)$$

2 利用 MODTRAN 辐射传输模式的反演试验

2.1 初估场

利用从气象台站获取的探空资料和大气标准廓线,进行插值和匹配处理,得到 MODTRAN 辐射传输模式计算中需要的 33 层大气廓线数据.并从经过处理后的大气廓线中计算出相应的大气可降水作为初始大气可降水.从探空资料计算大气可降水的公式如下

$$PW = \frac{1}{g} \int_{p_0}^0 x(p) dp. \quad (7)$$

其中, $x(p)$ 为水汽混合比,它随气压 p 而变, g 为重力加速度, p_0 为地面气压, PW 是气柱中的水汽总质量,即大气可降水,单位为 mm.

2.2 大气透过率计算

在计算大气透过率和进行卫星辐射亮温正演时都使用了 MODTRAN 辐射传输模式. MODTRAN 模

式是公认的以中等光谱分辨率(2cm^{-1})计算大气透过率和辐射值的标准模式. 整层透过率与透过率廓线的计算是很重要的. 计算时模式以波数(cm^{-1})为单位, 输出从某一层到大气层顶的各种气体的总透过率, 考虑卫星红外辐射仪的仪器响应函数 $\phi(\nu)$, 在波段 $\nu_1 \sim \nu_2$ 的平均透过率根据式(8)求出

$$\tau = \frac{\int_{\mu_2}^{\mu_1} \tau(\mu) \phi(\mu) d\mu}{\int_{\mu_2}^{\mu_1} \phi(\mu) d\mu} \quad (8)$$

2.3 卫星辐射值正演计算

利用 MODTRAN 模式, 在指定路径、输入大气廓线、指定气溶膜模式的参数之后, 可直接计算出单个波数的辐射值 I , 在波段 $\nu_1 \sim \nu_2$ 平均得到

$$I = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I(\nu) \phi(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\nu) d\nu} \quad (9)$$

在计算出系数方程(4)和方程(5)中的 C 和 D 后, 通过使用两个红外通道的正演辐射亮温和卫星实测得到的辐射值相减得到 δT_{11} 和 δT_{12} , 因此可计算得到 δU , 最后根据方程(6)计算出大气可降水.

2.4 反演结果

使用 1998 年 7 ~ 8 月中国地区的探空资料和 GMS-5 卫星资料对上述的物理分裂窗反演大气可降水的方法做了试验, 获取的探空资料有世界时 00h 和 12h 的资料, 我们做了两种试验. 第一种试验中, 使用 00h 探空廓线作为初始猜测廓线, 用 12h 的卫星资料反演 12h 的大气可降水, 并与 12h 高空探测资料计算的大气可降水进行匹配比较, 检验反演精度, 反演结果为: 对来自 1998 年 7 ~ 8 月 279 个样本统计得到均方根误差为 3.30mm, 如图 1 所示. 第二种试验中, 以同时间、不同地点的高空探测资料为初始值, 反演另一地点的晴空大气可降水, 结果与该地点的高空探测资料计算的大气可降水进行比较, 检验反演精度, 反演结果为: 对 1998 年 7 ~ 8 月 69 个样本统计得到均方根误差为 3.69mm.

另外利用卫星反演的 1998 年 7 月 20 日 00h(世界时)的大气可降水和由探空资料计算的大气可降水, 以及同时刻的卫星云图资料进行了比较分析, 如图 2 所示. 图 2(a)为探空资料计算的大气可降水经客观分析后划出的等值线图, 大气可降水单位为 mm; 图 2(b)为探空资料计算的大气可降水和卫星反演的大气可降水融合后, 再经过客观分析并划出等值线图; 图 2(c)为同时刻卫星红外云图. 对比图 2(a)和图

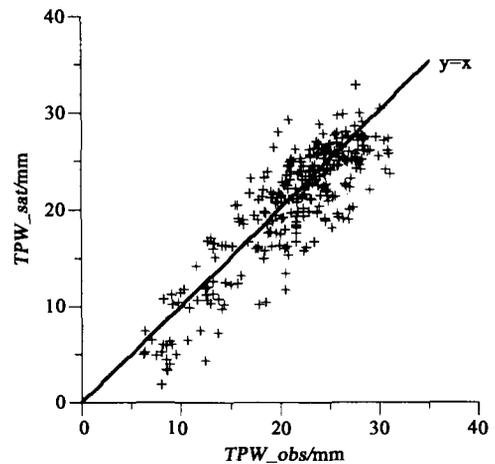


图 1 卫星反演的大气可降水与探空资料计算的可降水比较

Fig. 1 The retrieved TPW and TPW calculated from radiosonde data

2(b)发现: 在图 2(b)中大气可降水水平分布图中出现更多的细节; 在图像的左边部分, 也即中国西部等地区变化更大, 与云图匹配更合理些, 因为在图 2(c)中卫星云图上西部地区为大片云区, 但在东经 98° , 北纬 20° 附近地区出现大气可降水低值区, 而且等直线与白亮云区几乎呈正交分布, 这种不合理性主要是因为这些地区探空资料稀少的缘故; 同样在图像的右上角图 2(b)中大气可降水等直线与云图的配置也比图 2(a)中的更合理. 对于卫星云图上的小尺度对流云区, 在图 2(a)和图 2(b)中的大气可降水等直线图中都没有抓住, 可能是因为在这些地区没有探空站, 而卫星资料反演的又只是晴空区的大气可降水, 所以将这些信息漏掉了.

反演误差主要有以下几个原因引起: 探空资料探测的不准确性以及与卫星资料匹配时在时间和空间上的不一致性; 模式计算大气透过率时引起的误差, 因为在计算过程中像气溶胶模式使用的是辐射模式自带的某种气溶胶模式, 可能与当时的情况不符; 卫星资料正演和卫星实测资料都存在一定的误差; 还有在公式推导和具体实现过程中都做了一定的假设, 这些都是引起反演误差的原因.

3 利用 RTTOV7 快速辐射传输模式的反演试验

3.1 初估场

目前我们得到的数值预报资料无论从水平分辨率还是垂直分辨率与辐射传输模式的要求都有差距, 因此需要先对数值预报资料在水平和垂直方向

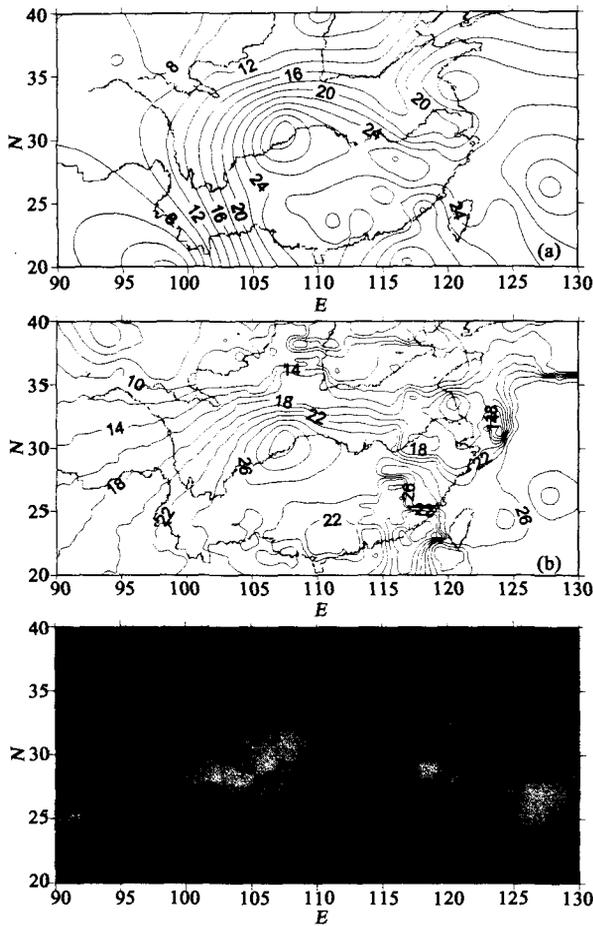


图 2 1998 年 7 月 20 日 00h (a) 探空资料计算的大气可降水等值线 (b) 探空资料计算和卫星反演的融合大气可降水等值线 (c) 红外云图

Fig. 2 (a) TPW contour from radiosonde data (b) blended TPW contour from radiosonde data and satellite retrieved (c) satellite infrared image at 00h July 20, 1998

作插值处理. RTTOV 模式将大气从地面到大气顶分成 43 层. 另外由于数值预报输出的水汽场没有到大气层顶, 因此高层的水汽使用了标准大气廓线的数据. 这里我们使用美国国家环境预测中心再分析 (NCEP) 资料中的温度场 (26 层) 和水汽场 (21 层), 水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 6h.

3.2 大气透过率计算和卫星辐射值正演计算

RTTOV7 是由 ECMWF 开发的用于模拟多种气象卫星探测的地球环境红外和微波辐射的快速辐射传输模式系统. RTTOV7 正演模式使用大气辐射传输方程的一种近似形式, 在大气层顶, 定义不考虑散射情况下, 对通道 i 的向上辐射可以表示为

$$L_i = (1 - N)L_i^{Cr} + NL_i^{Cld}$$

其中: N : 云量 (0 - 100%); L_i^{Cr} : 晴空大气层顶向上辐射; L_i^{Cld} : 云顶到大气层顶向上辐射.

大气可降水物理反演算法中利用辐射传输模式计算大气透过率廓线和整层大气透过率、大气层顶辐射值对亮温的偏导数, 并模拟卫星接收的辐射值和相应的亮度温度.

RTTOV7 快速辐射传输模式的输入参数包括: 卫星标志, 与卫星相匹配的系数, 下垫面类型, 地表温度, 地表气压和大气温湿廓线. 这里, 地表温度, 地表气压和大气温湿廓线数据由 NCEP 数值预报资料插值处理得到.

3.3 反演结果

选择 2002 年 6 月 4 日 00h (UTC) NCEP 数值预报场作为初估场, 用 2002 年 6 月 4 日 02h (UTC) 的 GMS-5 卫星红外分裂窗资料反演晴空条件下大气可降水. 云检测使用了文献 [7] 中提到的神经网络云分类算法. NCEP 数值预报温度场和湿度场在水平方向插值到卫星云图的像素位置上, 湿度场由相对湿度转换为模式输入需要的混合比. 在垂直方向, 数值预报资料与标准大气廓线相互匹配, 插值得到从地面到大气层顶的 43 层廓线. 由此反演得出这个时次晴空区的大气可降水 (图 3), 图 3 (a) 为红外云图, 图 3 (b) 为反演的大气可降水伪彩色图.

另外选择 2002 年 6 月 4 日 00h (UTC) NCEP 数值预报场作为初估场, 用 2002 年 6 月 4 日 00h (UTC) 的 GMS-5 卫星红外分裂窗资料反演晴空条件下大气可降水, 并且用 2002 年 6 月 4 日 00h (UTC) 的探空资料检验反演结果, 图 4 是反演的大气可降水和探空资料计算的大气可降水的散点图. 对这些数据进行统计计算得到: 反演的大气可降水和探空资料计算的大气可降水的均方根误差为 4.09 mm, 相关系数为 0.96.

大气可降水反演系统是在微机环境下实现的, 试验表明: 完成 GMS-5 原始分辨率全图范围的大气可降水计算, 利用 RTTOV7 快速辐射传输模式的系统约需 25 min, 比利用 MODTRAN 辐射传输模式的系统要快几倍.

4 结论

使用 GMS-5 卫星多通道资料, 用探空资料作为初估场, 由 MODTRAN 辐射传输模式计算大气透过率并进行卫星辐射值正演计算, 实现了卫星红外分裂窗通道反演大气可降水的物理反演算法. 用 1998 年夏季的资料进行反演试验, 并用常规探空资料做了精度检验. 结果表明: 使用 00h 探空廓线作为初估场和辐射传输模式输入廓线, 使用 12h 的卫星资料反

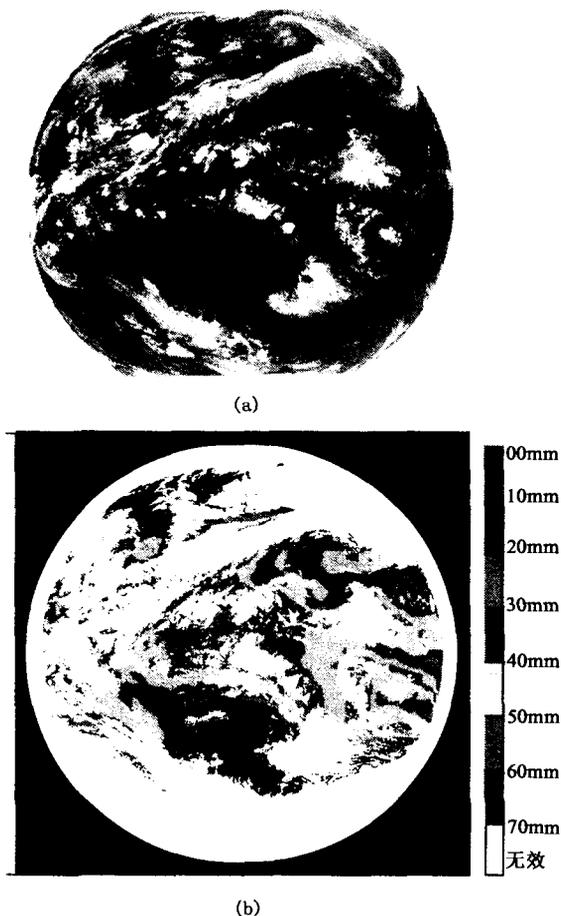


图3 2002年6月4日02h(UTC) (a) GMS-5 卫星红外通道云图 (b) 反演大气可降水(mm)伪彩色图

Fig. 3 (a) GMS-5 infrared image (b) retrieved TPW (mm) false color image at 02 July 4, 2002

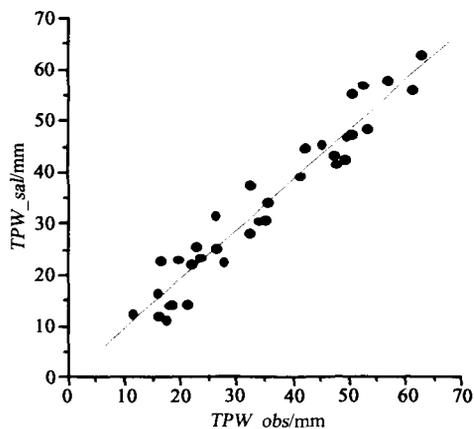


图4 探空资料计算的和卫星反演的大气可降水比较
Fig. 4 The retrieved TPW and TPW calculated from radio-sonde data

同时间、不同地点的高空探测资料为初始值,反演另一地点的晴空大气可降水,结果与该地点的高空探测资料计算的大气可降水进行比较,均方根误差为 3.69mm. 对卫星反演的和由探空资料计算的大气可降水资料进行融合,并插值到网络点上,绘制等值线图之后与同时刻的卫星云图比较分析表明:加入卫星反演的大气可降水信息之后,比单独使用探空资料绘制的等值线图能反映出更多水汽分布的细节,能够更合理地反映大气可降水的分布,特别是对于那些缺少常规探空资料的地区效果更明显. 为了在业务上实现大气可降水反演算法,用数值预报资料作为初估场,由 RTTOV7 快速辐射传输模式计算大气透过率并进行卫星辐射值正演计算,实现了卫星红外分裂窗通道反演大气可降水的物理反演算法. 用常规探空资料对反演的大气可降水进行检验得出均方根误差为 4.09mm. 试验结果表明:RTTOV7 快速辐射传输模式的引入,大大提高了反演速度,能够满足业务要求.

REFERENCES

- [1] LI Wan-Biao, LIU Ying-Hui, ZHU Yuan-Jing. Retrieval of atmospheric precipitable water with GMS-5 infrared measurements [J]. *Acta scientiarum naturalium universitatis pekinensis* (李万彪,刘盈辉,朱元竞. GMS-5 红外资料反演大气可降水. *北京大学学报(自然科学版)*), 1998, **34**(5): 632—638.
- [2] YAO Zhan-Yu, XU Chen-Hai. Estimation of precipitable water and its characteristics during the HUBEX/IOP 1998 [J]. *Advanced Atmosphere Science*, 2004, **20**(2): 219—226.
- [3] Jedlovec G J. Precipitable water estimation from high-resolution split window radiance measurements [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1990, **29**, 851—865.
- [4] Guillory A R, Jedlovec G J, Fuelberg H E. A physical split window technique for the retrieval of precipitable water from satellite measurements [A]. *Sixth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography* [C]. Atlanta: American Meteorological Soc., 1992, **73**: 297—300.
- [5] Knabb R D, Fuelberg H E. A comparison of the first guess dependence of precipitable water estimates from three techniques using GOES data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, **36**(5): 417—427.
- [6] Suggs R J, Jedlovec G J, Guillory A R. Retrieval of geophysical parameters from GOES: Evaluation of a split-window-technique [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**, 1205—1227.
- [7] SHI Chun-Xiang, QU Jian-Hua. NOAA-AVHRR cloud classification using neural networks [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (师春香,瞿建华. 用神经网络方法对 NOAA-AVHRR 资料进行云分类. *气象学报*), 2002, **13**(2): 250—255.

演 12h 的大气可降水,并与 12h 高空探测资料计算的大气可降水进行比较,均方根误差为 3.30mm;以