

GMS-5 估计可降水量的研究*

朱元竞 李万彪 陈勇

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

提 要

文章证明了由静止气象卫星 GMS-5 的分裂窗通道和水汽通道亮温反演可降水量的可行性, 探讨了 GMS-5 红外通道亮温与可降水量的关系, 建立了由 3 个通道亮温反演可降水量的经验公式. 用 60 组大气平均廓线, 对公式模拟检验误差为 0.18 g/cm^2 , 而用实际 124 组探空和对应的 GMS-5 亮温资料进行检验, 误差为 0.40 g/cm^2 . 用得到的经验公式可反演大范围的晴空可降水量分布.

关键词: GMS-5 分裂窗通道 水汽通道 可降水量

引 言

大气中水分的分布、传输及季节变化对天气和气候起着决定性的作用. 由于常规观测的局限, 卫星资料估计大气水汽的分布受到了广泛的重视^[1~5]. 在一些波段, 包括微波和热红外波段, 为了确定大气中水汽对卫星遥感的影响, 必须知道大气水汽含量. 本文研究的是大气柱垂直积分水汽含量, 称可降水量, 简称为 PW , 单位是 g/cm^2 .

卫星资料估计可降水量 PW 的研究, 主要采用热红外或微波观测资料. 表 1 列出了由长波红外窗区的卫星观测资料估计 PW 一些方法的概况. 为了用现有的气象卫星遥感陆地或海洋上的可降水, 许多研究主要使用 11 和 $12 \mu\text{m}$ 的分裂窗通道, GOES 卫星 VISSR 大气探测器(VAS)和 NOAA 卫星 AVHRR 探测器上载有这样的通道. 分裂窗通道亮温的差异主要是由于大气中水汽的不同吸收引起的, 所以分裂窗估计可降水的技术获得了巨大的成功. GMS-5 有类似 VAS 和 AVHRR 的分裂窗通道, 并新增加了水汽通道. 本文将通过模式模拟统计得到 GMS-5 红外通道亮温与 PW 的关系, 来证明由 GMS-5 估计可降水量的可行性.

1 红外探测原理

假定大气水平近似和局地热力平衡, 在分裂窗 $10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$ 和 $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波

* 本文由国家自然科学基金资助, 项目编号 49335060.
1996-06-26 收到, 1997-01-18 收到再改稿.

表 1 卫星红外资料反演 PW 的一些方法实例

作 者	反演方法	RMS(g/cm ²)
Aoki 和 Inoue, 1982 ^[1]	单 IR 通道; GMS	0.53
Chesters 等, 1983 ^[2]	GOES 上的 VAS 分裂窗	0.85
Chesters 等, 1987 ^[3]	GOES 上的 VAS 分裂窗	0.60
Kleespies 等, 1990 ^[4]	AVHRR 分裂窗	0.44
Anthony 等, 1993 ^[5]	GOES 上的 VAS 分裂窗	0.38

段或水汽通道 6.7~7.0 μm 波段, 忽略大气散射, 在单一波数 ν 的情况下, 卫星接收到的辐射 $I(\nu)$ 可用下式表示:

$$I(\nu) = \epsilon B(T_s, \nu) \tau(Z_s, \nu) + \int_{Z_s}^{Z_{st}} B(T(Z), \nu) (\partial\tau(Z, \nu)/\partial Z) dZ \quad (1)$$

式中 $B(T, \nu)$ 是温度 T 、波数 ν 的普朗克函数, $\tau(Z, \nu)$ 是同一波数 ν 时卫星和高度 Z 之间的大气透过率. 下标“ S ”和“ st ”说明一个物理量是在地表和卫星高度处的值. ϵ 是地球表面的辐射率, 对于上述大气红外窗区波段可认为是黑体, $\epsilon \approx 1$.

由于扫描辐射计的光谱响应的限制, 卫星接收到的某一红外波段总辐射为:

$$R = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I(\nu) \Phi(\nu) d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi(\nu) d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(T_s, \nu) \Phi(\nu) d\nu / \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi(\nu) d\nu \quad (2)$$

其中 ν_1 和 ν_2 是卫星这一红外通道波段以波数表示的下限和上限, $\Phi(\nu)$ 是 GMS 卫星扫描辐射计的光谱响应函数, T_s 是经过辐射定标后的等效亮温, 即卫星的观测亮温.

如果已知大气廓线, 可由式(1)计算 GMS-5 卫星 3 个通道接收到的地球表面和大气向上的辐射, 由式(2)计算相应通道的亮温. 可降水量由大气廓线直接求出. 下面的模拟计算就是以上述原理为基础的.

2 可降水量对 GMS-5 红外辐射的影响

2.1 分裂窗通道

GMS-5 分裂窗通道 10.5~11.5 μm 及 11.5~12.5 μm 波段的主要吸收物是 CO_2 、水汽和 O_3 等. 其中 CO_2 、 O_3 等的吸收不大. 用 Lowtran 7 计算热带大气分裂窗区大气各成分的透过率表明, 水汽谱线和水汽连续谱的吸收非常显著, 大气中水汽的吸收占主要的地位. 在晴空大气时, 可降水对卫星观测辐射的影响可及大气低层^[2].

图 1 给出了可降水量与红外分裂窗辐射的模拟结果, 也说明了为什么可以用红外分裂窗通道亮温计算可降水量 PW . 图 1 是对于热带大气和卫星天顶角为零时的卫星辐射率与 PW 的关系曲线, 还给出了地球表面和大气对卫星接收到的分裂窗区总辐射 R 的贡献. 可以看到, 大气的贡献随大气中水汽含量的增加而增加. 而地球表面辐射贡献随大气中水汽含量的增加而减小. 卫星所接收到的总辐射量随着可降水量 PW 的增加而减小.

2.2 水汽通道

GMS-5 上装有 6.5~7.0 μm 水汽通道, 用来获取水汽图像.

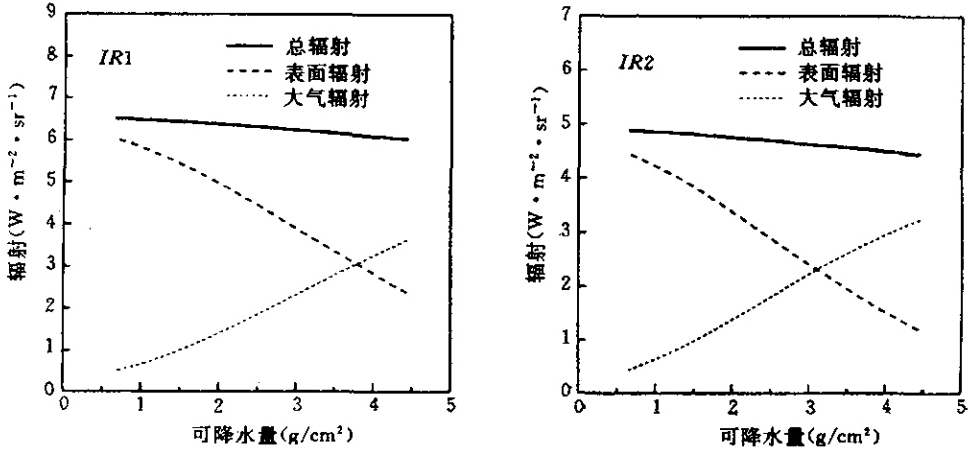


图1 可降水量PW与红外分裂窗辐射的关系

图2是水汽通道亮温变化随各层水汽廓线变化的模拟结果. 由图2可见, 水汽通道亮温对300~400 hPa高层的水汽改变最敏感, 这与Chesters等(1983)^[2]给出的结果一致. 低层水汽的改变对于水汽通道亮温无影响, 用水汽通道几乎测不出来. 在400 hPa附近, 亮温对湿度变化非常敏感. 所以水汽通道亮温反映了中高层大气的水汽分布.

2.3 可降水量与GMS-5通道亮温

图3给出了在热带标准大气状况下, 可降水量与GMS-5红外分裂窗通道以及水汽通道亮温的模拟结果. 图3(a)是为了说明中高层水汽变化对于GMS-5红外分裂窗通道以及水汽通道亮温的影响, 尽管水汽的改变量很小, 但水汽通道亮温的变化范围很大, 而红外分裂窗第一、第二通道的亮温变化却很小. 图3(b)是对于整层大气来说的, 随着PW的增加, 3个通道亮温逐渐降低. 分裂窗降低偏缓, 而且在数值上, 分裂窗第一通道的亮温值要高于分裂窗第二通道的亮温值, 并且随模式大气水汽量的增加, 分裂窗亮温差异显著. 所以, 分裂窗通道亮温的差异主要是由水汽的不同吸收引起的.

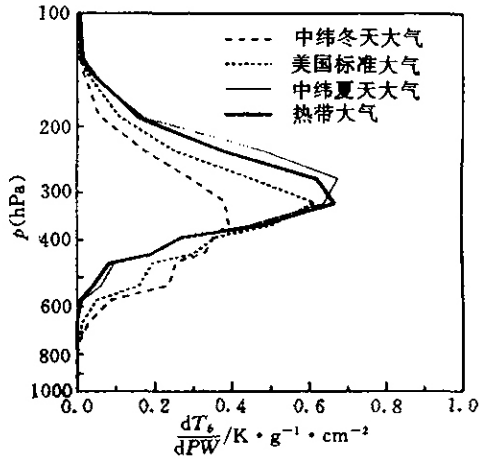


图2 不同高度水汽改变(增加)时, 水汽通道亮温减少量与高度(气压)的关系(水汽廓线的变化是各层的相对湿度相对增加50%)

3 可降水量的反演

3.1 经验关系

选定热带、中纬夏天、中纬冬天和美国1976年标准大气, 根据模式模拟获得了类似

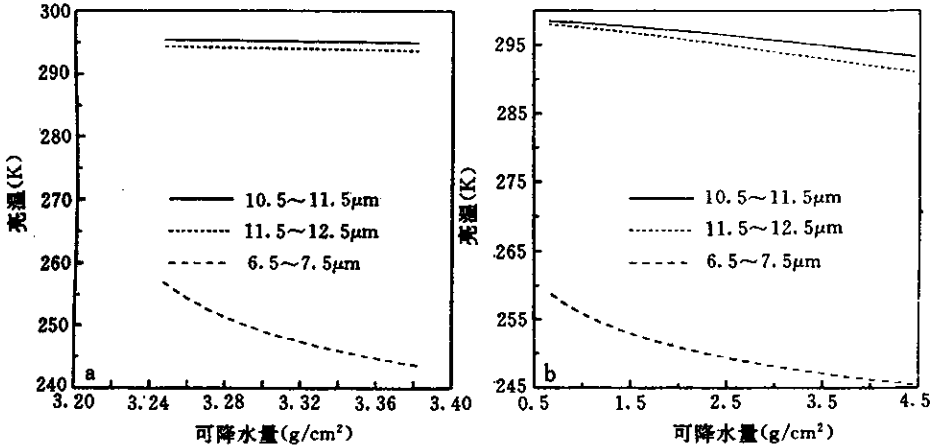


图3 热带大气, GMS-5 通道亮温与可降水量的关系 (a) 水汽变化(500 hPa 以上)
(b) 整层水汽变化

图3(b)中可降水量与 GMS-5 分裂窗通道和水汽通道亮温的 109 组数据, 称模拟值. 可降水量的变化是对模式大气的水汽廓线变化得到的, 在此过程中, 温度廓线保持不变, 不考虑卫星天顶角. 为了具有普遍性, 下面的统计选用上述 4 组大气.

根据上面分析, 在晴空状态下, 可降水对卫星分裂窗辐射的影响可及大气低层, 分裂窗通道亮温的差异主要是由水汽的不同吸收引起的以及水汽通道亮温反映了中高层大气的水汽分布. 采用上述数据和线性回归的方法, 可降水量 PW 与 GMS-5 分裂窗第一通道亮温 T_1 、分裂窗两通道亮温差 $(T_1 - T_2)$ 和水汽通道亮温 T_3 的经验关系为:

$$PW = 3.7715 + 0.0094T_1 + 1.6686(T_1 - T_2) - 0.0244T_3 \quad (3)$$

3.2 误差分析

式(3)对 109 组样本回归的均方差为 0.33 g/cm^2 , 其中计算可降水量与模拟降水值的相关系数为 0.95. 这个误差小于由 GOES 或 AVHRR 分裂窗等推导 PW 的误差(见表 1). 这里式(3)增加了水汽通道, 并加强了低层大气水汽的信息(T_1). 如果仅以分裂窗进行回归, 均方差为 0.35 g/cm^2 , 比增加水汽通道和分裂窗第一通道后精度稍差.

对 1989 年 12 个月, 纬度带 $0^\circ \sim 10^\circ\text{N}$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ\text{N}$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ\text{N}$ 和 $40^\circ \sim 50^\circ\text{N}$ 共 60 组平均大气廓线, 计算得到 GMS-5 红外通道亮温和可降水量的模拟值, 并以后者作为真值, 与用式(3)对可降水量计算值比较, 结果见图 4, 统计均方差为 0.18 g/cm^2 . 另外,

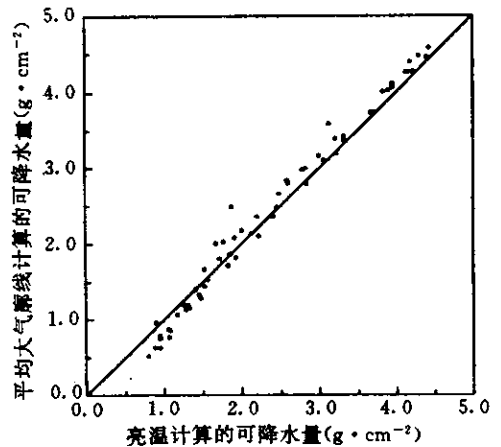


图4 平均廓线计算的可降水量与由亮温计算的可降水量的关系

选取了1996年1月31日00:32 GMT的GMS-5实时三红外通道亮温资料,并获取了00:00 GMT所对应的探空资料.将亮温资料匹配到探空站地理经纬点上,得到19组对应的亮温和可降水量值,其中可降水量由探空得到的大气廓线计算得到.由亮温计算PW的反演值与探空实测值进行比较(见图5(a)),反演均方差为 0.41 g/cm^2 ;选取1996年9月GMS和对应的00:00 GMT探空资料共105组进行比较(见图5(b)),反演均方差为 0.40 g/cm^2 .综合124组数据,反演误差为 0.40 g/cm^2 ,与用AVHRR或GOES的分裂窗资料反演可降水量的误差是一致的(表1).这些结果证明了由GMS-5分裂窗和水汽通道亮温反演可降水量是可行的.

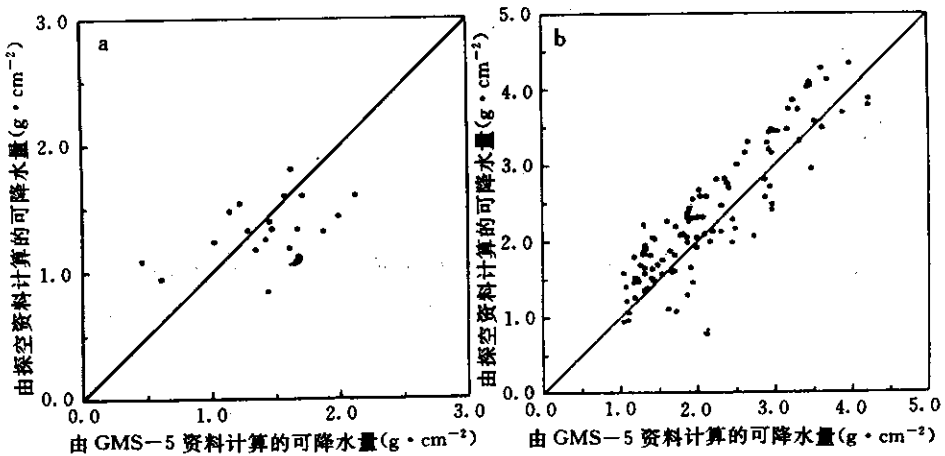


图5 可降水量反演值与探空资料实测值的关系,(a)1996年1月31日00:00 GMT
(b)1996年9月00:00 GMT

为了说明真实可产生的误差,在热带标准大气的情况下,模拟计算了卫星红外亮温随机噪声对PW的影响.在300 K时,红外亮温的噪声是 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,由此认为分裂窗两通道亮温差($T_1 - T_2$)的随机噪声为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$.在这些噪声情况下,模拟的可降水量误差(RMS)见表2.随机噪声引起的误差是真实误差(0.40 g/cm^2)产生的原因之一,当然也不排除探空资料的误差.比较表2的PW误差,真实检验的误差(0.41 g/cm^2)已是相当满意了,这从另一方面肯定了水汽反演方法的可行性.从表2中还可看到,水汽通道亮温噪声引起的PW误差很小,这是中高层水汽含量较少的缘故.

3.3 反演试验个例

为了检验式(3)在晴空下对可降水量遥感的可行性,本文做了反演试验.图6是一次反演结果,其中图6a是陆地下垫面得到的晴空可降水量等值线的分布,图6b是洋面上得到的晴空可降水量等值线的分布.反演试验时间是1996年6月

14日05:32 GMT.

表2 红外亮温随机噪声引起的可降水量的误差RMS

红外亮温	随机噪声($^\circ\text{C}$)	RMS(g/cm^2)
T_1	0.5	0.15
$T_1 - T_2$	1.0	0.21
T_3	0.5	0.01

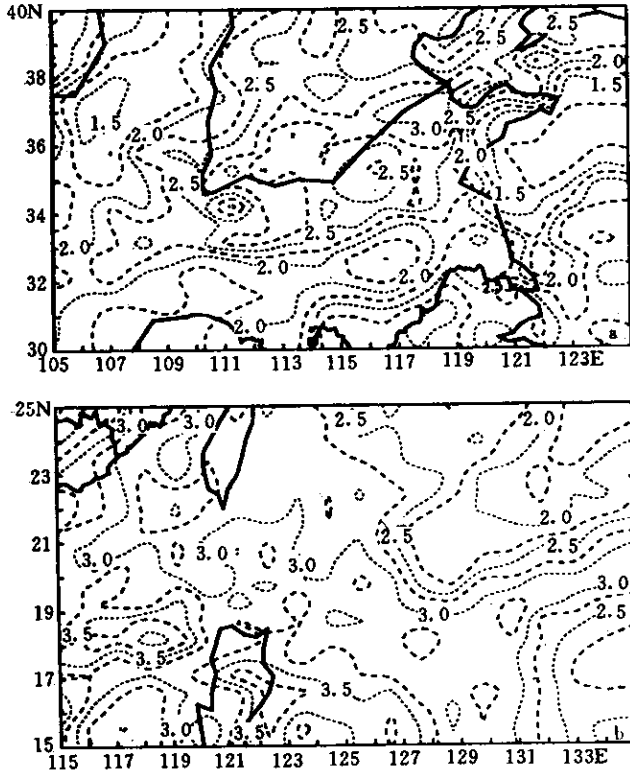


图6 可降水量 $PW(g/cm^2)$ 反演分布(时间: 1996年6月14日 05:32 GMT)
(a) 陆地 (b) 洋面

4 结 论

在晴空状态下,可降水对卫星分裂窗辐射的影响可及大气低层,分裂窗通道亮温的差异主要是由水汽的不同吸收以及水汽通道亮温反映了中高层大气的水汽分布的特征引起的.在4种模式大气下,通过改变湿度廓线,用模拟的方法建立了GMS-5通道亮温与可降水的经验关系.证明了由GMS-5观测的分裂窗和水汽通道亮温导出PW的可行性,并获得了反演可降水量等值线分布.

在60组大气状况下对这一关系进行模拟检验,得到模拟反演的PW的均方差为 $0.18 g/cm^2$.另外选取GMS-5实时资料和对应的探空资料共124组对公式的反演结果进行检验,均方差为 $0.40 g/cm^2$,这一误差与用AVHRR或GOES的分裂窗资料反演可降水量的误差一致.

参 考 文 献

- 1 Aoki T and Inoue T. Estimation of precipitable water from the IR channel of the geostationary satellite. *Remote Sens. Environ.*, 1982, 12: 219~228.

- 2 Chesters D, Uccellini L W, Robinson W D. Low-level water vapor fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) "split window" channels. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 725~743.
- 3 Chesters D, Robinson W D and Uccellini L W. Optimized retrievals of precipitable water from the VAS split window. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 1059~1066.
- 4 Kleespies T J and McMillin L M. Retrieval of precipitable water from observations in the split window over varying surface temperature. *J. Appl. Meteor.*, 1990, **29**: 851~862.
- 5 Anthony R Guillory, Gary J Jedlovec, Henry E Fuelberg. A technique for deriving column-integrated water content using VAS split-window data. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 1226~1241.

STUDY OF TOTAL PRECIPITABLE WATER BY GMS-5

Zhu Yuanjing Li Wanbiao Chen Yong

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

The feasibility for the retrieval of precipitable water (PW) by using GMS-5 infrared "Split Window" and vapor channel brightness temperatures (BT) is demonstrated. The relationship between GMS-5 IR channel BT and PW is discussed and an empirical formula of retrieval PW is presented by using the three channels of BT . The results show that RMS errors simulated from 60 groups of atmospheric mean profiles and retrieved by GMS-5 real-time BT data and 124 radiosonde data are 0.18 g/cm^2 and 0.40 g/cm^2 , respectively. The wide range PW distribution of clear air can be retrieved by using this empirical formula.

Key words: GMS-5 Split window channels Water vapor channel Precipitable water