

文章编号: 1007-4619(2006)05-0742-07

用神舟三号中分辨率成像光谱仪数据 反演大气水汽

黄意玟, 董超华, 范天锡
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要: 2002 年 3 月中国神舟三号飞船发射成功, 所携带的中分辨率成像光谱仪获取了一批 940nm 波段的遥感数据。本文用其中的部分资料做了反演水汽的试验, 给出一些结果和分析。

关键词: 卫星资料反演; 大气水汽总量; 近红外通道

中图分类号: TP732/P407 **文献标识码:** A

Using the Information of Spacecraft SHEN ZHOU-3 Moderate Resolution Imaging Spectrometer to Retrieve Atmospheric Water Vapour

HUANG Yi-bin, DONG Chao-hua, FAN Tian-xi
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In the year 2002, the spacecraft SHEN ZHOU-3 was launched successfully. The moderate resolution imaging spectrometer on the spacecraft acquired a lot of data at 940nm interval. Using part of the information we tried to retrieve the water vapor amount. Some analytical results are presented in this paper.

Key words: satellite data retrieval; atmospheric water vapor amount; near infrared channels

1 原 理

由于在陆地上空, 用热红外和微波遥感大气水汽很困难, 20 世纪 90 年代以来, 许多学者一直研究用 940nm 吸收带探测大气水汽的问题^[1-7]。结果表明这是可行的, 而且是对热红外和微波遥感大气水汽的很好补充。在近红外波段, 卫星接收的地球表面和大气辐射可表示为:

$$L = L_s \rho_e \tau + L_p \quad (1)$$

式中, 第一项表示地表反射的直射太阳辐射, L_s 是大气顶的太阳辐射, ρ_e 为地表反射率, τ 是对应“太

阳—地表—卫星”这一“V”字型光路的大气透过率。第二项 L_p 叫做程辐射, 就是在光线路程上产生的辐射, 主要来源于气溶胶散射。

当大气清洁、能见度高的时候, 气溶胶含量少, 程辐射以单次散射为主, 多次散射贡献很小。在这种情况下, 可以假设程辐射与式中第一项成比例^[4]。因此, 式 (1) 可改写为

$$L = CL_s \rho_e \tau \quad (2)$$

若卫星选用的遥感通道中只存在气溶胶消光和水汽吸收, 式 (2) 中总的大气透过率 τ 就应该包含两部分: 气溶胶消光 τ_a 和水汽吸收 τ_{wv} 。假设这两种过程是各自独立的, 式 (2) 则可以简单地写为:

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-25

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 黄意玟 (1938—), 女, 副研究员, 1959 年毕业于山东大学物理系。主要从事与卫星遥感有关的大气辐射研究工作。

$$L = CL_s \rho_e \tau_a \tau_{wv} \quad (3)$$

如果在距离上述的水汽吸收通道最近的波长附近选取一个只有气溶胶消光、不存在任何气体吸收的窗区通道,则有:

$$L_0 = C_0 L_{00} \rho_{e0} \tau_{a0} \quad (4)$$

式(3)与式(4)相除并取自然对数,得

$$\ln(L/L_0) = \ln(cL_s \rho_e \tau_a / c_0 L_{00} \rho_{e0} \tau_{a0}) + \ln \tau_{wv} \quad (5)$$

一些科学家研究的结果表明, τ_{wv} 与光路上的水汽总量 m 有如下关系^[1,3,4]:

$$\tau_{wv} = e^{A\sqrt{m}}, \quad A < 0 \quad (6)$$

当光谱通道确定后, (5)式右侧第一项不随 m 变化, 记为 B , 就得到:

$$\ln(L/L_0) = B + A\sqrt{m}, \quad A < 0 \quad (7)$$

用 θ_s 和 θ_v 表示观测时刻的太阳天顶角和卫星天顶角。当 θ_s 和 θ_v 不太大时, 垂直气柱中的水汽总量 m_0 近似为:

$$m_0 = m / (1/\cos\theta_s + 1/\cos\theta_v) \quad (8)$$

式(7)左侧的量和 θ_s 与 θ_v 可由卫星观测得到。若系数 A 与 B 为已知, 就可由式(7)和式(8)求出垂直气柱中的水汽总量 m_0 。

2 遥感器简介

中国神舟三号飞船于 2002 年 3 月发射升空, 中分辨率成像光谱仪观测试验随即开始。这台遥感器在 940nm 水汽吸收带设有多个通道, 本文采用了其中 4 个, 它们的序号和中心波长如表 1。

表 1 水汽通道的序号和位置

Table 1 Water vapor channels number and position

通道号	25	26	27	28
中心波长 /nm	906	926	947	968

通道半值宽度均为 20nm。通道 26 和 27 靠近吸收带峰值位置, 吸收较强, 通道 28 吸收较弱, 通道 25 吸收最弱^[3]。由于通道 26 和 27 吸收较强, 随着水汽量的增加它们的吸收能力也容易达到饱和, 以致不再能反映水汽量的变化, 因此这种通道适于测量干燥大气。相反, 通道 25 吸收最弱, 在水汽较多时其测量信号仍不会饱和, 可以测量潮湿大气。由此看出: 中分辨率成像光谱仪设置了多个吸收本领有明显差异的水汽通道, 使之能够适应水汽总量变化大的特点, 在潮湿的或干燥的大气状态下都可能获得有用的数据, 是该遥感器突出的优点之一。除

以上 4 个通道外, 还采用了两个窗区通道, 分别为波长 864nm 的第 23 通道和波长 1008nm 的第 30 通道。宽度也都为 20nm。

在 4 个水汽吸收通道中, 第 25 和 26 通道的波长距窗区通道 23 较近, 通道 28 则距通道 30 较近, 所以试验中用 25/23、26/23 和 28/30 通道对反演水汽。通道 27 与通道 23 和 30 的距离分别为 83nm 和 61nm, 虽然距通道 30 稍近, 但通道 30 的信噪比明显不如通道 23, 所以仍采用 27/23 组合。

3 试验

3.1 求取反演系数 A 和 B

如前所述, 利用式(7), 式(8)由卫星资料反演水汽时, 式中的 L/L_0 和 θ_s, θ_v 可由卫星资料得到, 剩余的问题就是求取系数 A 和 B 。系数 A 代表水汽的吸收本领, 与温度、气压有关^[1,4]。系数 B 与地表反射率和气溶胶光学特性有关。 A 和 B 都与遥感器的技术参数有关。

如果用常规气象资料求出气柱中的水汽总量 m_0 , 再提取出同时同地的卫星观测值 L/L_0 和 θ_s, θ_v 。当这些数据足够多时, 可按式(7), 式(8)用统计回归方法得到系数 A 和 B 。然后再将这些系数用于反演其他的卫星资料。文献[7]就是用这种方法和 FY-1C 卫星资料反演水汽的。但神舟三号在轨运行时间不够长, 不能提供足够多的资料作为样本, 用来得到回归系数。因此难于采用这种统计方法。本文采用常规气象资料和辐射传输模型生成若干数据对 $\ln(L/L_0)$ 和 m , 然后再用这些样本做统计回归, 得到系数 A 和 B 。

目前国内外有多种辐射传输计算程序, 可用于不同的问题。本文选用了 6S 模型。这一模型是为模拟太阳光波段的卫星信号而设计的。程序简洁, 运行较快, 所输出的大气顶的辐亮度值或表观反射率值可以是分谱的, 也可以是通道的积分值, 光谱分辨率为 2.5nm, 计算精度为 1%^[8]。

系数 A 和 B 与地表反射率和大气状态等参数有关, 而这些参数随地区和季节变化。因此 A 和 B 在不同地区、不同季节也应该取不同的值。在本试验中选取了两个区域, 一为内蒙古中南部和华北北部 (36°—41°N, 106.25°—116.25°E) 区域, 这一带多为戈壁沙漠, 大气干燥, 把它叫做区域 1; 另一叫做区域 2 位于 29.5°—34.5°N, 112.55°—122.55°E 范围内, 是长江中下游到淮河之间的平原地区。多农田、植被, 大气

湿润。本文选取了 2002 年 4—6 月期间的常规气象资料。按照要求,在区域 1 收集到 48 组数据;因区域 2 有云的日子多,只收集到 19 组数据。将这些数据及所需的辅助数据输入 6S 模型就可计算出卫星接收的辐射量 L 和光路上的水汽量 m 。

用以上数据进行回归,生成两个区域各个通道对的系数 A 和 B 。

在区域 1

$$\ln(L25/L23) = -0.04m - 0.11$$

相关系数 -0.9862 (9)

$$\ln(L26/L23) = -0.27m^{1/2} - 0.05$$

相关系数 -0.9972 (10)

$$\ln(L27/L23) = -0.52m^{1/2} - 0.13$$

相关系数 -0.9971 (11)

$$\ln(L28/L30) = -0.23m^{1/2} + 0.11$$

相关系数 -0.9977 (12)

在区域 2

$$\ln(L25/L23) = -0.02m - 0.29$$

相关系数 -0.9900 (13)

$$\ln(L26/L23) = -0.23m^{1/2} - 0.21$$

相关系数 -0.9970 (14)

$$\ln(L27/L23) = -0.44m^{1/2} - 0.44$$

相关系数 -0.9965 (15)

$$\ln(L28/L30) = -0.19m^{1/2} - 0.02$$

相关系数 -0.9960 (16)

以上 8 个相关系数都大于 0.98,说明这些公式的可信度很高。需指出的是:式 (9) 和式 (13) 的形

式与其他不同,它们右侧的变量是 m 而不是 $m^{1/2}$,这是由于通道 25 的吸收太弱,以至于用 $m^{1/2}$ 回归的相关性较差,然而与 m 的相关性却很好。

3.2 反演

有了式 (8)–(16),就可由飞船资料反演两个试验区域的水汽含量 m_0 。为此,在区域 1 和区域 2 各选了三条轨道的飞船资料。

区域 1:

2002 年 3 月 30 日 76 轨

2002 年 4 月 17 日 356 轨

2002 年 5 月 30 日 1033 轨

区域 2:

2002 年 6 月 01 日 1061 轨

2002 年 6 月 12 日 1234 轨

2002 年 7 月 13 日 1722 轨

这 6 条轨道的原始资料经过定位、去除探元间的不均匀性和云检测等预处理后,用以反演两块区域中晴空部分的气柱水汽含量。对每条轨道都采用了多个光谱通道对的数据。因此,对每一气柱,将反演得到多个水汽总量值。

3.3 用常规探空值验证反演结果

为了检验反演结果,在每条轨道覆盖的区域内选取若干同日、无云、能见度好的探空站点。把探空的水汽值作为真值 (u) 与反演的水汽含量 (m) 作比较,结果见表 2 和表 3。

表 2 区域 1 反演结果的检验 (气柱水汽量 / g/cm^2)

Table 2 Validate the retrieval result of the area 1 (water vapor amount / g/cm^2)

轨道号	参量	u	m_{53}	m_{63}	$u - m_{63}$	m_{73}	$u - m_{73}$	m_{80}	$u - m_{80}$
76	最小值	0.45	2.14	0.43	-0.17	0.32	-0.56	0.20	-0.39
76	最大值	0.95	3.55	0.91	0.21	1.30	0.28	1.34	0.40
76	平均误差				0.06		-0.01		0.05
76	标准差				0.14		0.26		0.31
356	最小值	0.27	1.57	0.19	0.02	0.11	0.08	0.08	-0.06
356	最大值	0.38	2.54	0.27	0.19	0.24	0.27	0.41	0.30
356	平均误差				0.11		0.16		0.08
356	标准差				0.12		0.17		0.16
1033	最小值	0.74	2.45	0.59	-0.08	0.54	-0.03	1.06	-0.82
1033	最大值	1.48	3.17	0.90	0.77	0.88	0.86	1.69	0.28
1033	平均误差				0.33		0.39		-0.29
1033	标准差				0.45		0.50		0.49

表 3 区域 2 反演结果的检验 (气柱水汽量 $/g/cm^2$)Table 3 Validate the retrieval result of the area 2 (water vapor amount/ g/cm^2)

轨道号	参量	u	m ₅₃	u-m ₅₃	m ₇₃	m ₈₀	u-m ₈₀
1061	最小值	2.27	2.46	-1.00	0.54	2.21	-0.87
1061	最大值	3.99	3.49	1.53	1.05	3.59	1.78
1061	平均误差			-0.20			0.02
1061	标准差			0.92			0.91
1234	最小值	2.38	3.04			2.12	
1234	最大值	2.59	3.12			2.12	
1234	平均误差			-0.60			0.37
1234	标准差						
1722	最小值	4.62	3.04	-0.05	0.58	2.33	-1.87
1722	最大值	5.76	5.73	2.23	2.57	7.55	3.43
1722	平均误差			1.29			0.82
1722	标准差			1.52			2.36

表中水汽总量值,分别记为 m_{53} , m_{63} , m_{73} 和 m_{80} , m 后的第一位数字是水汽吸收通道序号中的第二位数字, m 后的第二位数字是窗区通道序号中的第二位数字。例如 m_{53} 就是用水汽吸收通道 25 和窗区通道 23 的数据反演得到的。

根据探空得到的气柱水汽含量,区域 1 中 356 轨最干燥,水汽总量都在 $0.4g/cm^2$ 以下; 76 轨次之,水汽总量在 $0.4-1g/cm^2$ 之间; 1033 轨不太干燥,水汽总量在 $0.7-1.5g/cm^2$ 之间。从表 2 可看出:

(1) 通道 26 和 27 对于 76 轨、1033 轨反演的结果都不错。反演值覆盖的范围接近探空值的范围, 26 比 27 更好。探空水汽含量值不大于 $0.7g/cm^2$ 时,反演值与探空值相差较小。当水汽探空值超过 $0.7g/cm^2$ 时,通道 26 和 27 的反演误差开始变大,而且随着水汽量的增加误差越来越大。这可能与吸收渐趋饱和和有关。对最干燥的 356 轨,两个通道的反演值都小于探空值。可能是因为水汽太少,仪器信噪比已不够高。

(2) 用 25/23 通道对反演的气柱水汽总量值全部都在探空值覆盖的范围以外,而且相差很远,说明通道 25 不适于反演干燥大气的水汽。

(3) 通道 28 的反演值与探空值所覆盖的范围比较接近,平均误差也不大,但标准差比较大。该通道的中心波长为 $968nm$,已经位于探测器性能下降的波段,致使反演值比较离散,但系统偏差并不大。

表 3 所列区域 2 的数据表明:

(1) 对 6 月的两条轨道,用通道 28 反演所得结果较好,通道 25 的平均误差比通道 28 大。然而,对于能见度大于 $5km$ 的多数站点,通道 25 的反演值更接近探空值。气柱水汽含量大于 $2.4g/cm^2$ 时,通道 28 的反演误差明显变大,超过了通道 25 而这时除个别大气能见度低的站点外,通道 25 的误差依然都不大。对 7 月的 1722 轨,通道 28 的离散度明显变大。

(2) 用通道 26 和 27 反演的水汽值与探空值相差甚远,说明不适用于反演潮湿大气的水汽。

以上检验表明:试验中选用的 4 个水汽通道,由于吸收本领不同,各自适于测量不同大小的水汽含量。因此,只有选用的通道合适,才能得到好的反演结果。

3.4 多个通道对的组合

试验结果提出了一个问题,即怎样从多个通道对中进行选取,才能得到最接近真实的反演值。对于干燥地区不能用通道对 25/23,对于潮湿地区,通道对 26/23 和 27/23 不适用,对于其余通道对,则可以采用加权平均的方法,来获取最佳反演结果。

通过比较发现,对干燥的区域 1,当反演值 m 小于 $0.7g/cm^2$ 时,通道 26 的误差比较小;当 m 值大于 $0.7g/cm^2$ 后,26/23 和 27/23 的误差有所增大,超过 $1g/cm^2$ 时,误差已相当大。通道 28 在区域 1

的平均误差和均方根差不比通道 27 差, 还是可用的。此外, 考虑到通道 27 信噪比不太好, 反演值的离散度比通道 26 大, 而且比通道 28 容易饱和。因此在区域 1 最终的反演值由 26 /23 和 28 /30 两个通道对的反演值加权平均得到。对于区域 2, 26 /23 和 27 /23 两个通道对不适用。通道 28 在 $m < 2.4g/cm^2$ 时误差小, m 超过 $2.4g/cm^2$ 后误差显著变大。对通道 25, 除个别低能见度的站点外误差都不太大。因此区域 2 的最终反演值由 25 /23 和 28 /30 两个通道对的反演值加权平均得到。

这样, 最终的反演公式为:

区域 1:

$$m_{68} \begin{cases} (f_{33}m_{63} + f_{00}m_{80}) / 2 & f_{33} = f_{00} = 1 \\ 0.74 & f_{33} = f_{00} = 0 \\ f_{33}m_{63} + f_{00}m_{80} & f_{33} \text{ 或 } f_{00} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

区域 2:

$$m_{58} \begin{cases} (f_{33}m_{53} + f_{00}m_{80}) / 2 & f_{33} = f_{00} = 1 \\ 2.40 & f_{33} = f_{00} = 0 \\ f_{33}m_{53} + f_{00}m_{80} & f_{33} \text{ 或 } f_{00} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, 各个权重 f 如表 4 所列, m 单位为 g/cm^2 ;

表 4 通道对的权重

Table 4 Weight factor of channel pairs

	m_{63}	m_{80}	m_{53}
$f=1$	≤ 1	$0.7 < m_{80} < 2.4$	≥ 2.4
$f=0$	> 1	$0.7 \geq m_{80} \geq 2.4$	< 2.4

用多通道对组合的反演公式所得的部分结果见表 5 和表 6。表中还列出了与反演值作比较的探空值及辅助数据。

表 5 区域 1 晴空站点的多通道对反演结果

Table 5 Multichannel pair retrieval result of the area 1 clear sky station

年 月 日	轨道号	探 空			反 演		
		站名	能见度 /km	气柱水汽量 $u / (g/cm^2)$	$m_{68} / (g/cm^2)$	$u - m_{68} / (g/cm^2)$	$u - m_{68} / u \%$
2002-04-17	356	额济纳旗	30	0.27	0.25	0.02	7.4
2002-04-17	356	张家口	30	0.35	0.27	0.08	23
2002-04-17	356	乌拉特中旗	30	0.38	0.19	0.19	50
2002-04-17	356	呼和浩特	30	0.38	0.25	0.13	34
2003-03-30	76	银川	30	0.45	0.46	-0.01	-2.2
2003-03-30	76	西安	11	0.56	0.47	0.09	16
2003-03-30	76	呼和浩特	12	0.60	0.43	0.17	28
2003-03-30	76	延安	14	0.64	0.64	0	0
2003-03-30	76	东胜	30	0.70	0.49	0.21	30
2003-03-30	76	北京	7	0.74	1.01	-0.27	-36
2003-03-30	76	张家口	30	0.95	1.08	-0.13	-14
2003-05-30	1033	呼和浩特	25	0.74	1.19	-0.45	-61
2003-05-30	1033	东胜	30	0.86	0.83	0.03	3.5
2003-05-30	1033	张家口	30	1.27	1.30	-0.03	-2.4
2003-05-30	1033	临河	20	1.48	0.96	0.52	35
最小值				0.27	0.19	-0.45	-61
最大值				1.48	1.30	0.52	50
平均值						0.04	7.4
均方根值							

表 6 区域 2 晴空站点的多通道反演结果

Table 6 Multichannel pair retrieval result of the area 2 clear sky station

年 月 日	轨道号	探 空			反 演		
		站名	能见度 /km	气柱水汽量 $u / (g/cm^2)$	$m_{58} / (g/cm^2)$	$u - m_{58} / (g/cm^2)$	$u - m_{58} / u / \%$
2002-06-01	1061	阜阳	8	2.27	2.48	-0.21	-9.3
2002-06-12	1234	射阳	20	2.38	2.62	-0.24	-10
2002-06-12	1234	阜阳	15	2.59	2.58	0.01	0.39
2002-07-13	1722	南京	6	4.62	3.46	1.16	25
2002-07-13	1722	阜阳	12	5.00	4.29	0.71	14
2002-07-13	1722	安庆	12	5.68	5.95	-0.27	-4.8
最小值				2.27	2.48	-0.27	-10
最大值				5.68	5.95	1.16	25
平均值						0.19	2.5
均方根值						0.58	

比较表 5 的多通道对反演结果和表 2 的三个单通道对的反演结果,可以看出:多通道对反演值覆盖的范围更接近探空,平均误差仅为 $0.04g/cm^2$,反演值的离散度也有改进。表 6 列出区域 2 中能见度大于 5km 的晴空站点的多通道对反演结果,与表 3 单通道对反演结果比较,误差明显变小。这一试验结果用实际的数据显示出中分辨率成像光谱仪设有多个水汽通道的独特优点。

4 可能的误差来源

将 (7) 式左侧表示为 r 得到

$$r = \ln(L/L_0) = B + A\sqrt{m} \quad (19)$$

对上式两边取微分,得到:

$$\Delta m = (2\sqrt{m}/A)\Delta r - (2\sqrt{m}/A)(\sqrt{m}\Delta A + \Delta B) \quad (20)$$

依据上式,水汽反演值的误差主要来源于两方面:

(1) 卫星资料的误差,对应上式右边第一项;(2) 反演系数的误差,对应上式右边的第二项。对 (19) 式微分还可得到:

$$\Delta r = \Delta L/L - \Delta L_0/L_0 \quad (21)$$

表明卫星资料引入的误差,取决于吸收通道辐亮度误差和窗区通道辐亮度误差间的差。通道辐亮度值通过定标得到,定标公式为:

$$L = GX + I \quad (22)$$

式中, X 为计数值, G 和 I 是定标系数。两边取微分得到

$$\Delta L = X\Delta G + G\Delta X + \Delta I \quad (23)$$

卫星所测的辐亮度误差包括定标误差和计数值本身的误差,计数值误差可来源于遥感仪器测量误差、图像定位误差、云和气溶胶的影响等。

反演系数 A 和 B 的误差与多个因素有关,包括求取系数时所用大气廓线的代表性、地表反射率数据以及气溶胶参数是否符合实际、正演模式 6s 的误差等。在处理过程中所用的大气廓线取自常规气象资料,资料的年份和季节与卫星资料是相同的,而且考虑到干燥地区和潮湿地区分别求取系数,因此大气廓线造成的误差应不大。获得地表反射率数据和气溶胶参数比较困难。为了使设定的地表反射率值比较合理,在地面实测数据^[9,10]中选择了 51 种植物、50 种岩石和 2 种土壤的值求平均。关于气溶胶参数,由于只选用了地面能见度大于 10km 的大气廓线,气溶胶很少,既使所设的气溶胶类型和廓线与实际情况有差别,对所得到的反演系数影响也不大^[6]。6S 模型的误差是固定的。在以上条件下求出的反演系数,相关系数都大于 0.98 且反演结果的检验也表明,这些反演公式基本上是正确的。

反演系数引入误差的原因主要有两点:(1) 设定的地表反射率与实际值间有一定误差。(2) 6S 模型的固有误差,特别是当气溶胶散射和气体吸收两

种效应同时存在时, 6S不能处理两种效应的耦合问题, 致使在较强吸收波段计算结果产生误差^[8]。

实际上, 误差的主要来源可能是: (1)定标误差; (2)神舟三号飞船的过境时间与探空观测时间相差较大, 而且探空值本身也有误差, 所以用作检验的水汽值并不等于真值, 与反演的水汽含量之间会偏差较大。

5 结 论

(1)用 940nm水汽吸收带多个通道的卫星资料反演大气柱水汽含量, 在中国还是第一次, 在不同气象条件和地表状况的区域都得到了较好的结果。

(2)用不同探测通道反演同一气柱的水汽含量, 结果差别很大。吸收强的通道 26和 27适用于水汽少的情况, 例如气柱水汽含量在 $1\text{g}/\text{cm}^2$ 以下的情况; 吸收弱的通道 25适于水汽多的情况, 例如气柱水汽含量大于 $2.4\text{g}/\text{cm}^2$ 的情况。通道 28介于二者之间。

(3)用多个通道对组合可以得到最佳结果, 这是神舟三号中分辨率成像光谱仪的优越之处。

(4)大气干燥与大气湿润地区生成不同的反演系数, 有利提高反演精度。

(5)本试验中, 假定了多次散射的贡献与单次散射成比例。这一假定在海面上难以成立, 所以试验中只选用了陆地区域。水面上空的水汽总量通常可由长波红外分裂窗方法得到, 而用分裂窗反演陆地水汽总量又恰恰误差很大, 所以这两种方法在实际应用中可相互补充。

参 考 文 献 (References)

[1] Frouin R, Deschamps P Y, Lecomte P. Determination From Space of Atmospheric Total Water Vapor Amounts by Differential Absorption Near 940nm; Theory and Airborne Verification [J].

J Appl Meteor, 1990, 29(6): 448-460.

[2] King M D, Kaufman Y J, Menzel W B, et al. Remote Sensing of Cloud Aerosol and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(1): 2-27.

[3] Kaufman Y J, Gao B C. Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS/MODIS [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(5): 871-884.

[4] Gao B C, Goetz A F H. Column Atmospheric Water Vapor and Vegetation Liquid Water Retrievals from Airborne Imaging Spectrometer Data [J]. J Geophys Res, 1990, 95 (D4): 3549-3564.

[5] Huang Y B, Dong C H. Feasibility Experiments on Sounding Water Vapor Amount with 940nm Spectral Band [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(2): 184-192. [黄意珍, 董超华. 用 940nm通道遥感水汽总量的可行性试验 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 184-192.]

[6] Huang Y B, Dong C H, Liu Z Q, et al. Computing Test on the Reflectance in 940nm Water Vapor Channel [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(4): 413-421. [黄意珍, 董超华, 刘志权等. 940nm水汽通道反射率计算试验 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 413-421.]

[7] Zhang G, Xu J M, Huang Y B. Remote Sensing of Total Column Perceptible Water Vapor with Two Sun Reflectance Channels of FY-1C Satellite [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(4): 385-394. [张弓, 许健民, 黄意珍. 用 FY-1C两个近红外太阳反射光通道的观测数据反演水汽总含量 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 385-394.]

[8] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1994, 35(3): 675-685.

[9] Tong Q X, Tian G L, Wang E H, et al. Spectral and Analysis of Typical Earth Objects of China [M]. Beijing: Science Press, 1990. [童庆禧, 田国良, 王尔和等. 中国典型地物波谱及其特征分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.]

[10] China Science Academy. Space Science and Application Center CAS. Aeronautics and Space Environment Manual [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2000. [中国科学院空间科学与应用中心. 宇航空间环境手册 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.]