

940 nm 水汽通道反射率计算试验*

黄意玢 董超华 刘志权 潘 宁

(国家卫星气象中心,北京 100081)

提 要

利用近红外波段大气与辐射的相互作用解决用红外波段不容易遥测低层水汽的问题。选用 940 nm 水汽弱吸收带进行通道反射率计算试验,分析其对不同环境参数的敏感性。结果表明,940 nm 附近通道的辐射信号携带了整层大气水汽信息,有可能用来获取大气水汽总量。

关键词:水汽通道 反射率 敏感性试验

引 言

众所周知,大气中的水汽含量是重要的气象参数。目前已在实际应用的卫星红外方法,在探测低层水汽方面有一定困难^[1]。微波方法是一种很好的探测手段,但又遇到下垫面放射率复杂、空间分辨率低等问题的困扰。近一、二十年来国内外一些专家研究用 940 nm 弱吸收带探测水汽总含量,并已开始用于卫星遥感,例如 1999 年美国发射的 EOS 和我国的 FY-1C 卫星都选择了这类通道。为更好地利用这些通道的信息,我们计算了卫星高度上 940 nm 通道的反射率,并分析其对水汽含量和其他参数的敏感性。结果表明,940 nm 附近通道的辐射信号携带了整层大气中水汽的信息,有可能利用其反演出大气水汽总含量。

在 940 nm 附近,卫星遥感器接收的射出辐射主要是地气系统反射和散射的太阳辐射。也就是说射出辐射可分为两部分:一是地表反射的直射太阳辐射;二是气体分子和气溶胶散射的太阳辐射,以及这种散射辐射在地表和大气中多次反射或散射对射出辐射的贡献。我们把射出辐射的第 2 部分叫做程辐射,因此卫星接收的辐射量 $L(\lambda)$ 可表示为

$$L(\lambda) = L_{\text{sun}}(\lambda) T(\lambda) \rho(\lambda) + L_{\text{path}}(\lambda) \quad (1)$$

式中 λ 代表通道的中心波长, $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 代表大气外的太阳辐射, $T(\lambda)$ 、 $\rho(\lambda)$ 分别为大气透过率和地表反射率, $L_{\text{path}}(\lambda)$ 为程辐射。

分析式(1)可以看出,卫星所接收的辐射信号 $L(\lambda)$ 是多种因素的函数。由于纬度或时间不同,太阳的入射角不同,因此在不同目标上的太阳辐照度也不同,这样就造成 $L(\lambda)$ 随太阳位置而变化;地表类型和覆盖物多种多样,反射率 $\rho(\lambda)$ 各不相同, $L(\lambda)$ 也必然不同。大气的影晌最为复杂。因为大气是由许许多多气体分子组成的,这些分子会使

* 本项研究得到 FY-3 气象卫星预研究课题资助。

2001-01-15 收到,2001-06-19 收到修改稿。

辐射从光路上散射出去,从而削弱传感器接收到的辐射信号,同时它们也会将光路外的辐射散射到光路内,使传感器接收到的信号增强。这种分子散射作用的大小取决于大气分子的数密度或气压。另外气溶胶颗粒也通过散射既有削弱又有增强光信号双重作用。由于气溶胶的类型、浓度不同,它们的散射作用也不同。此外,因为我们考虑的是水汽吸收通道,因此直射太阳光和散射光都受到光路上水汽的吸收,使光信号减弱。减弱的多或少取决于水汽含量和水汽的吸收能力。水汽含量随季节和纬度有明显变化。吸收能力又受温度影响。因此,不同的大气温、湿、压廓线也会影响 $L(\lambda)$ 。根据以上分析,我们改变一些参数的数值,计算得到不同的 $L(\lambda)$ 。下文给出计算方法和结果以及对结果的分析。

1 敏感性计算试验

为了分析水汽对卫星信号的影响,需对 940 nm 附近通道反射率的敏感性进行计算试验。式(1)无法直接用来作计算试验,为此,我们采用了 6S^[2] 计算程序。对于均匀的各向同性的地面情况 6S 所用计算公式如下:

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu E_s} \quad (2)$$

$$\rho^* = \left[\rho_a + \frac{\rho}{1 - \rho_s} T(\theta_s) T(\theta_v) \right] T_g \quad (3)$$

式中 L 代表卫星测量得到的辐亮度, $\mu = \cos(\theta_s)$, θ_s 是太阳的天顶角, E_s 是大气外的太阳辐照度, ρ^* 是地-气系统的等效反射率。在式(3)中大气的散射反射率 ρ_a 和球反照率 s 源于散射以及大气-地表的耦合。如知道大气分子的密度廓线(或气压廓线)和气溶胶颗粒的密度廓线,以及光路的几何参数,则可用计算散射辐射的一般方法得到。 ρ 是地表反射率, $T(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v)$ 分别是太阳至地面和地面至卫星的光路的透过率,可以实测也可由计算得到。 T_g 代表吸收气体的透过率,用经验的无规带模式计算得到。在计算 ρ_a 、 s 、 $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 和 T_g 等量时,假定大气的温、湿、压和气溶胶廓线以及 θ_s 、 θ_v 、 ρ 和 E_s 为已知,然后由式(2)和式(3)分别计算得到 ρ^* 和 L 。

在计算中,假设地表反射率为各向同性,卫星传感器垂直向下观测。其他参数则取值如下:

- 1) 太阳天顶角的取值范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$, 每隔 10° 计算一次。
- 2) 选取常用的 6 条大气廓线。
- 3) 气溶胶分为大陆型和海洋型两类,含量的多少以能见度表示,分别为 5 km、23 km 和 50 km。
- 4) 地表反射率在陆地区域取为 $0.1 \sim 0.5$, 间隔为 0.1; 在海洋区域则取为 0.1 和 0.05。

根据上述约定,我们计算了 4 个水汽通道(中心波长分别为 903 nm、923 nm、943 nm 和 963 nm)及其两侧窗区通道(中心波长为 863 nm 和 1023 nm)的辐亮度和通道反射率,来分别代替式(2)和(3)中的 L 和 ρ^* 。所有通道宽度均取 20 nm。

2 结果与分析

2.1 水汽通道透过率计算和分析

表 1 列出了不同观测高度上计算得到的 4 个水汽通道的透过率。分析表 1 得到:(1)在较潮湿的中纬度夏季和较干燥的中纬度冬季,不论是处于水汽带边缘的弱吸收通道还是处于带中心附近的较强吸收通道,如 1、4 通道(即 CH1 和 CH4)和 3 通道(即 CH3),整层大气的透过率仍近似在 30% 以上。这说明仍有近三分之一以上的入射辐射可以到达卫星高度而被遥感器接收;(2)在对流层下部,所有通道的透过率值随高度都有明显变化,而从 10 km 到外空,则相对变化都小于 0.3%。这说明水汽的消光作用主要在对流层,这是因为大气中水汽主要集中于对流层的缘故;(3)冬季透过率值略高于夏季。从以上 3 点分析我们可以得出如下结论:即这些水汽通道携带有整层大气水汽的信息,可以用来测量水汽总量。

表 1 不同大气状态和不同高度时的通道透过率计算值

高度 (km)	中纬度夏季大气				中纬度冬季大气			
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH4
	893 ~ 913 (nm)	913 ~ 933 (nm)	933 ~ 953 (nm)	953 ~ 973 (nm)	893 ~ 913 (nm)	913 ~ 933 (nm)	933 ~ 953 (nm)	953 ~ 973 (nm)
1.5	0.81791	0.77003	0.39606	0.65607	0.91425	0.90085	0.63159	0.83524
3.0	0.77083	0.71242	0.32644	0.58996	0.89946	0.86087	0.55339	0.78042
10.0	0.74224	0.67898	0.29457	0.55572	0.85397	0.83229	0.51166	0.74579
外空	0.74026	0.67716	0.29374	0.55431	0.85182	0.83022	0.51030	0.74399

2.2 水汽通道信号敏感性试验

2.2.1 水汽通道的反射率随太阳天顶角的变化

在中纬度夏季和中纬度冬季的大气条件下,取陆地区域地表反射率为 0.3,海面反射率为 0.05;假设陆地区域为大陆型气溶胶,海面为海洋型气溶胶,气溶胶含量均以 23 km 的能见度表示。在相同气溶胶含量情况下,分别计算陆地和海洋区域各个通道的反射率随太阳天顶角的变化。我们将吸收最弱的 903 nm 和吸收最强的 943 nm 两个通道的计算结果示于图 1。图 1 中 a 和 b 分别表示陆地和海洋两种情况。比较图 1 中的 a 和 b 可

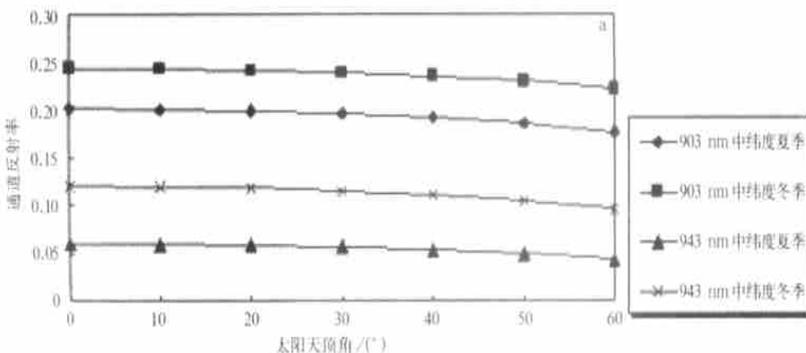
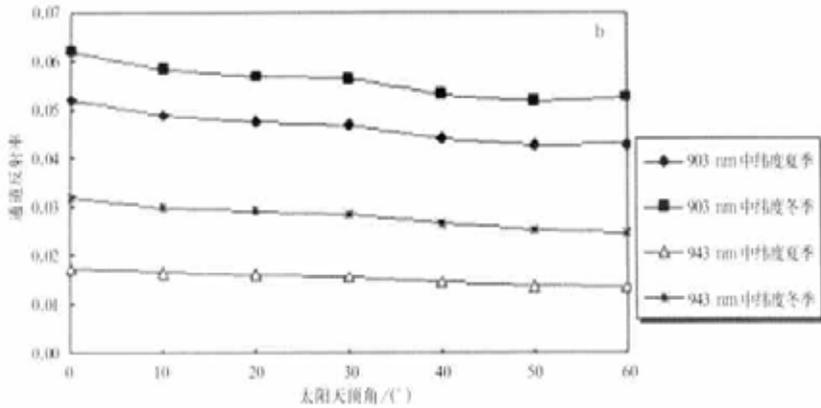


图 1 陆地(a)和海洋(b)区域通道反射率与太阳天顶角的关系



续图 1

知,地表反射率高则通道反射率亦高,反之则低。共同的变化趋势为:当太阳天顶角由 0° 增大至 60° 时,通道的反射率均略有下降,但在陆地区域下降幅度的绝对值小于 0.03,在海面上下降幅度小于 0.01。

2.2.2 水汽通道反射率随表面反射率的变化

在标准大气廓线条件下,取太阳天顶角为 40° ,对气溶胶的假设与上一节相同,计算的水汽通道反射率示于图2。图2中a和b分别表示陆地和海洋两种情况。分析图2可知,各水汽通道的反射率在陆地区域都低于地表反射率,在海洋区域则有高有低。在陆

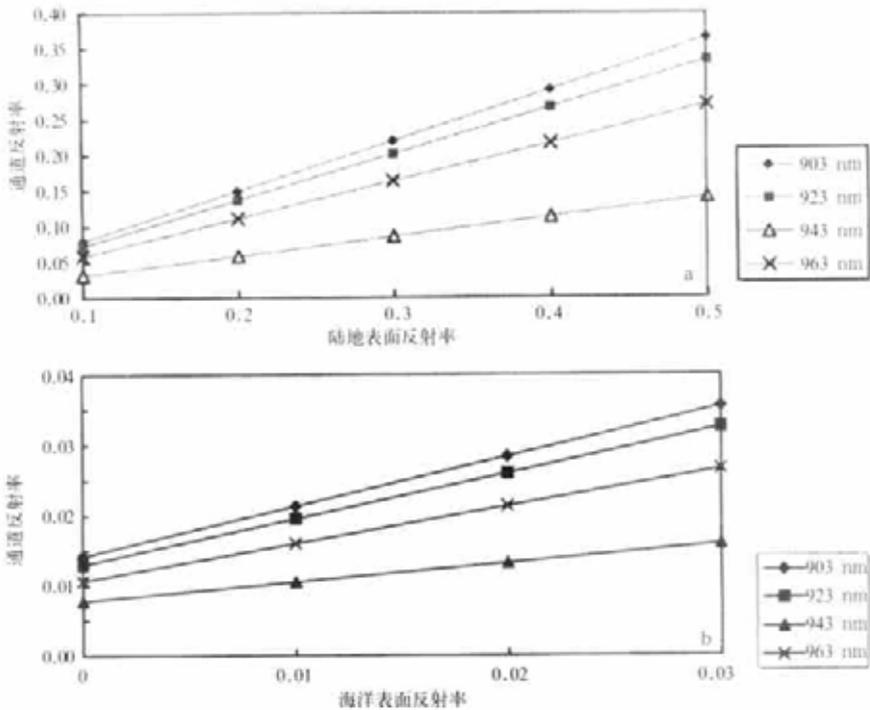


图 2 陆地(a)和海洋(b)气溶胶模式下通道反射率与表面反射率的关系

地区域通道反射率的增大略慢于表面反射率的增大,但较接近于线性增大;在海洋区域通道反射率与海面反射率也接近线性关系,但不如陆地情况好。

2.2.3 不同温、湿、压廓线条件下水汽通道的反射率

在计算中我们取太阳天顶角为 40° , 陆地区域的地表反射率为 0.3, 海面反射率为 0.05, 气溶胶含量以 23 km 能见度表示。计算的通道反射率示于图 3。图 3 中 a 和 b 分别表示陆地和海洋区域的水汽通道反射率。按图标中自上而下 6 种大气模式的水汽总量 (cm) 依次为 4.120、2.930、0.853、2.102、0.419 和 1.424。分析图 3, 可以明显看出水汽含量大的热带大气, 通道反射率值最低, 干燥的副极区大气, 通道反射率最高。

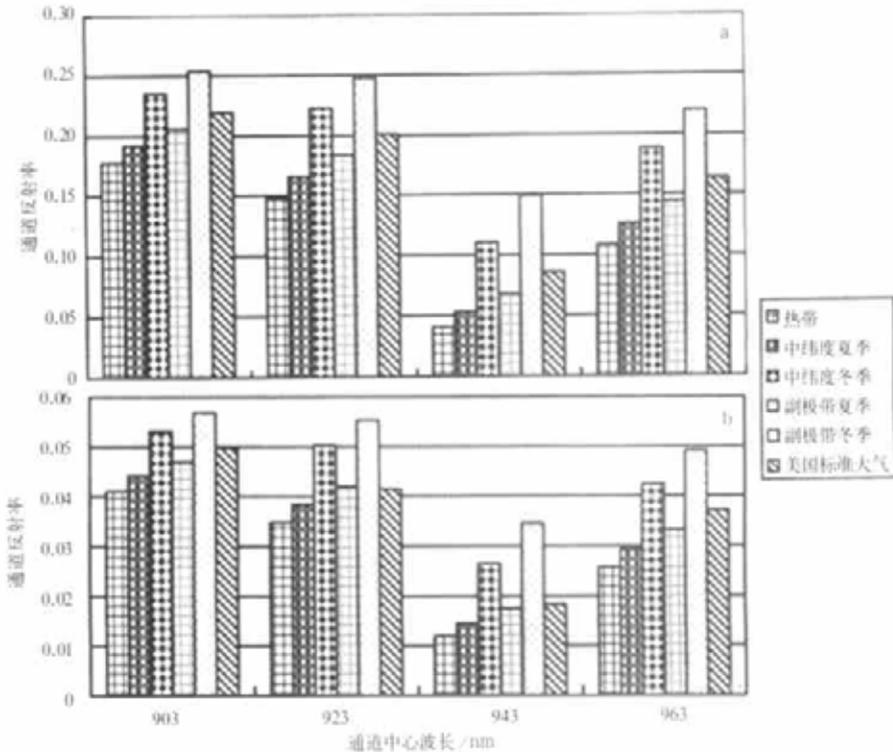


图 3 陆地(a)和海洋(b)气溶胶模式的通道反射率与大气模式的关系

2.2.4 相同廓线下,水汽含量对通道反射率的影响

与上一节相同,取太阳天顶角为 40° , 地表反射率为 0.3, 陆地型气溶胶的含量以 23 km 能见度表示。为说明水汽含量变化的影响,取标准大气温、压廓线,但水汽的总含量取为 0.7 cm、1.4 cm、2.5 cm、2.9 cm 和 4.1 cm。在以上参数条件下计算了吸收带边缘的 903 nm 通道的反射率和带中心的 943 nm 通道的反射率,示于

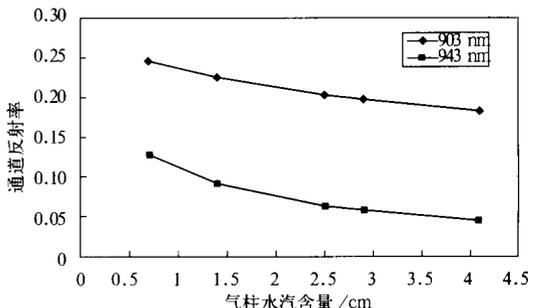


图 4 通道反射率随水汽总量的变化

图 4。

我们首先观察图 3 和图 4 中 903 nm 通道的情况。在图 3 中通道反射率最小约 0.18, 最大为 0.25 多一些。这一变化是温度、湿度同时变化产生的综合效果。然后看图 4, 903 nm 通道的反射率大约从 0.18 多一些变化到 0.24 多一些。变化范围比图 3 略小, 但却很相近。对于吸收较强的 943 nm 通道, 图 3 和图 4 的情况也很相似。这说明温度变化虽然也影响通道反射率, 但与水汽含量变化的影响相比, 几乎可以忽略不计。

2.2.5 θ_s 、 ρ 和 U_{H_2O} 影响的综合分析

太阳天顶角 θ_s 、地表反射率 ρ 和大气中水汽的含量 U_{H_2O} 都对通道所测到的地-气系统反射率 ρ^* 有影响。前面已分别给出模拟计算结果和分析。那么, 这些因素所产生影响的相对重要性如何呢? 在实际应用中这是必然要考虑的。为此, 我们作了如下的计算与分析。

为进行比较, 在计算中选用一种基本的计算条件: 在标准大气的温、湿、压廓线下, 大气气溶胶含量以 23 km 的能见度表示; 气溶胶类型在陆地区域设为大陆型, 在海洋区域则定义为海洋型; θ_s 和 U_{H_2O} 分别取为 20° 和 1.424 cm(标准大气的水汽含量); 地表反射率 ρ 在陆地区域为 0.2, 在海洋区域为 0.05。在设定的这些条件下, θ_s 、 ρ 和 U_{H_2O} 分别变化 10%、50%和 100%, 计算通道反射率 ρ^* 的相对变化。例如在标准大气和 23 km 能见度条件下, θ_s 和 U_{H_2O} 固定为 20° 和 1.424 cm, 陆地表面的反射率由 0.20 变为 0.22、0.30 和 0.40, 通道反射率 ρ^* 的变化情况。表 2 分别列出 903 nm 通道和 943 nm 通道在陆地区域和海洋区域的计算结果。

表 2 水汽通道中 θ_s 、 ρ 和 U_{H_2O} 的信息含量

%

	903 nm			943 nm			
	10 %	50 %	100 %	10 %	50 %	100 %	
陆地	θ_s	- 0.2	- 1.1	- 2.8	- 0.5	- 2.8	- 6.9
	ρ	9.3	47	95	9.1	46	91
	U_{H_2O}	- 1.5	- 6.5	- 12	- 3.2	- 22	- 36
海洋	θ_s	- 0.4	- 1.1	- 7.3	- 0.4	- 2.6	- 9.0
	ρ		34	69		31	63
	U_{H_2O}	- 1.3	- 5.8	- 10	- 4.5	- 18	- 29
	1.3	8.0		4.9	24		

表 2 中 U_{H_2O} 的变化是相对于 1.424 cm 变化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 50\%$ 和 100%, 所以“ U_{H_2O} ”行中有出现两个数值的情况。上面的数值对应水汽增加的情况; 下面的数值对应水汽减少的情况。分析表 2 可以看出:

(1) 引起通道反射率变化的首要因素是表面的反射率, 其次是大气温、湿、压廓线。太阳天顶角的影响最小。这样的规律我们认为是合理的。正如在引言中所叙述, 卫星接收的辐射包括两部分: 地表反射的直接辐射以及程辐射。一般来说, 当地表反射率不是很小的情况下, 第 1 部分的贡献大于第 2 部分。也就是说, 遥感仪器接收的大部分辐射是反射的直射太阳辐射, 当然地表反射率的高低是首要的影响因素。第 2 部分的程辐射主要

是由散射产生。随太阳天顶角增大,光路长度增大,因而自光路上散射出去的辐射量增加了,但同时由于散射进入光路的辐射量也增多了。因此总的效果是削弱了太阳天顶角变化产生的影响。

(2) 水汽含量变化的绝对值相同时,通道反射率 ρ^* 对水汽含量的减少更为敏感。当水汽含量减少至 1 cm 以下时,由于水汽含量变化产生的影响已接近地表反射率变化产生的影响。

(3) 吸收较强的通道与吸收较弱的通道比较,前者更为灵敏。

2.2.6 水汽通道的反射率对气溶胶含量的敏感性

在做水汽通道反射率对气溶胶含量敏感性试验时,我们假定太阳天顶角为 40° ,地表反射率为 0.1 和 0.5 两种。只对不同含量的大陆型气溶胶,分别计算了中纬度地区夏季和冬季水汽通道的反射率和射出辐亮度。计算结果列于表 3。表 3 中 ρ^* 是通道反射率, L 是辐亮度(单位是 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。分析表 3 我们发现:首先,不论是冬季或夏季,也不论地面反射率较高还是较低,在能见度较高(大于 20 km)的晴空区,气溶胶含量变化对 4 个水汽通道反射率的影响很小。这是表中数据显示的第一个特征。产生这一现象的原因可以这样解释:4 个水汽通道处于近红外波段,在这里分子散射的影响已微乎其微,可以忽略。散射物质主要是气溶胶。如前所述,散射有消光和增强辐射的双重效应,在能见度较高或者说气溶胶含量不大的情况下,这两种效应几乎互相抵消了。然而当气溶胶含量变大的时候,例如能见度从 23 km 降低为 5 km 时,4 个通道的反射率都有明显变化。这是表 3 中数据显示出的第 2 个特征。第 3 个特征是在低反射率和高反射率的表面上空,通道反射率的这种变化趋势是相反的:即地表反射率低的情况下通道反射率变大,地表反射率高时通道反射率变低。这是由于地表反射率低时对通道反射率的贡献主要来源于散射,在气溶胶含量大的情况下,它增添的散射辐射就多,同时,反射辐射被削弱得也多。但由于地面反射率低,削弱掉的反射辐射的绝对值是小的,因此总的效果是射出辐亮度增大,通道反射率变大。而高地表反射率情况下散射辐射的影响成为次要的。但散射对地表反射辐射的削弱却有明显影响,因此总的效果是气溶胶含量增加表现为辐射

表 3 各通道在不同含量气溶胶和不同表面反射率(ρ)状况下的反射率(ρ^*)和辐亮度计算值(L)

能见度 (km)		夏季				冬季				
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH4	
5	ρ^*	0.0721	0.0621	0.0216	0.0468	0.0876	0.0824	0.0421	0.0690	
		L	16.952	13.993	4.661	9.689	20.615	18.674	9.082	14.272
	$\rho=0.1$	ρ^*	0.0703	0.0608	0.0213	0.0463	0.0855	0.0807	0.0414	0.0681
		L	16.541	13.713	4.596	9.573	20.109	18.195	8.940	14.094
	50	ρ^*	0.0703	0.0608	0.0213	0.0463	0.0854	0.0807	0.0414	0.0682
		L	16.526	13.707	4.596	9.578	20.092	18.188	8.940	14.100
23	ρ^*	0.2777	0.2398	0.0755	0.1819	0.3411	0.3230	0.1599	0.2737	
		L	65.323	54.055	16.306	37.628	80.240	72.826	34.528	56.624
	$\rho=0.5$	ρ^*	0.3162	0.2728	0.0854	0.2065	0.3886	0.3677	0.1816	0.3110
		L	74.392	61.502	18.451	42.719	91.418	82.909	39.214	64.346
	50	ρ^*	0.3221	0.2778	0.0869	0.2102	0.3958	0.3745	0.1849	0.3166
		L	75.770	62.631	18.776	43.489	93.115	84.438	39.924	65.513

注: L 的单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

信号被削弱,通道反射率降低。这一分析也解释了以下现象,就是当表面反射率低时,射出辐亮度有小幅度的增加;当表面反射率高时,射出辐亮度却有明显的降低。由此得出结论:在相同的温、湿、压廓线下高含量的气溶胶会降低亮暗目标间的对比度。

2.2.7 不同通道的反射率

从以上列出的所有图表看出:903 nm、923 nm、963 nm 和 943 nm 4 个水汽通道的透过率值依次从大到小排列,其反射率值也是从大到小排列。当其他条件相同时,影响射出辐射的主要因素就是水汽吸收的强弱。透过率越大表明吸收越弱,在光路上辐射能量的损耗就越少,因此通道的反射率值就大,否则通道反射率就小。再分析图 4,当气柱水汽含量较小,比如小于 2 cm 时,吸收较强的 943 nm 通道的曲线较陡,说明在较干燥情况下吸收强的通道与吸收弱的通道相比,前者灵敏度高。这是因为水汽含量增加不够大时,弱吸收通道的吸收增量很小,不够明显,强吸收通道的吸收增量相对就大,比较明显。由此推论,随着水汽含量的增加,强吸收通道容易达到饱和,造成灵敏度下降。因此吸收强的通道较适于测量干燥大气,吸收弱的通道较适于测量潮湿大气。

3 结 论

(1) 从对透过率的分析表明,940 nm 附近通道的辐射信号携带了整层大气中水汽的信息,使我们有可能利用该通道探测整层大气的水汽含量。

(2) 940 nm 附近通道的信号受太阳-地表-卫星的相对位置、地表类型和状态、大气状态的影响,是多种参数的函数。几个主要参数的影响可归纳如下:

① 影响通道反射率的首要因素是地表反射率。随着地表反射率增大,通道反射率几乎是线性增大。在陆地区域,通道反射率小于地表反射率;在海洋区域,除通道在吸收带中心的情况外,通道反射率大多高于海面反射率。

② 影响通道反射率的第 2 位因素是大气温、湿、压廓线。其中决定性的因素是大气水汽含量。潮湿的热带大气通道反射率最低,干燥的副极区大气通道反射率最高。

③ 对 940 nm 吸收带边缘的通道或带中心的通道,随太阳天顶角的增大通道反射率都略有下降。但与地表反射率引起的变化相比,变化幅度要小一个数量级。

④ 在晴朗洁净的大气状态(能见度大于 20 km)下,940 nm 附近任一通道反射率对气溶胶含量的多与少并不太敏感,几乎没有变化。但当能见度降低为 5 km 时通道反射率发生明显变化。对低反射率的地表,大气由洁净变得浑浊时,通道反射率由小变大;对较高反射率的地表则相反,大气由洁净变浑浊时通道反射率由大变小。因此浓密气溶胶的影响表现为降低亮暗目标的对比度。

⑤ 处于 940 nm 吸收带不同部位的通道,对辐射的吸收程度不同。因此,在相同的日照条件和大气状态下卫星观测得到的反射率各不相同,每个通道的反射率随水汽含量的变化也不相同。吸收较强的通道,如 943 nm 通道,其反射率较低。处于吸收带边缘的通道,如 903 nm 和 963 nm 波段吸收微弱,其反射率较高。在干燥大气情况下吸收较强通道的反射率随大气柱中水汽含量的变化比弱吸收通道明显;但当大气柱水汽含量较大时通道反射率随水汽含量的变化情况则相反,弱吸收通道比强吸收通道明显。因此像 943

nm 吸收较强的通道适于探测干燥大气,而 903 nm、963 nm 弱吸收通道较适于探测潮湿大气。

综上所述,940 nm 附近通道包含有整层大气水汽的信息并有一定的敏感,有可能利用其探测大气中水汽总量。

感谢:绘图时,得到胡秀清与王维和同志热情帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 金燕,黄意玢,王维和.静止气象卫星水汽通道位置的选择.应用气象学报,1992,3(增刊):67~73.
- 2 Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 35(3): 675~685.

COMPUTING TEST ON THE REFLECTANCE IN 940 nm WATER VAPOUR CHANNEL

Huang Yibin Dong Chaohua Liu Zhiquan Pan Ning
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

Based on the interaction between atmosphere and radiance in the near infrared band, conducted is the remote sensing of low-level water vapor, a problem that is hard to solve through the infrared band. The reflectance in 940 nm channel, which is in a weak water vapor absorption spectral band, is calculated, and its sensitivities to various environmental parameters are analyzed. The results show that signals from channels in the 940 nm band carry water vapor information from the whole atmosphere. The water vapor amount can be probably retrieved from it.

Key words: Water vapor Channel reflectance Sensitive experiment