

2—25 微米谱区大气透过率计算*

汪 勤 模

(中央气象局卫星气象中心)

摘要——本文对参考文献 [1] 的大气透过率计算程序作适当的简化处理和模式说明。给出近、中红外谱区的辐射在大气中透过率的部分计算结果,并作了初步分析。

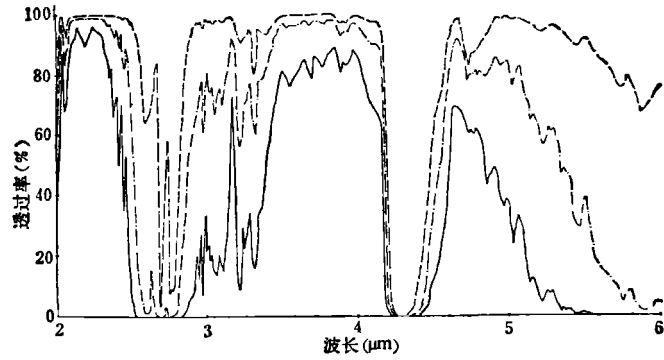
利用红外辐射进行遥感的基础,是依据于辐射场和物质的相互作用。从事红外辐射在大气中传输的理论和实验研究(比如为遥感仪器选择适当的探测通道、从遥感信息中提取有用的参数等)的科技人员,都需要红外辐射在大气中的透过率资料。

我们对文献[1]中的透过率计算程序作了适当的简化处理,即仅仅选取从不同高度到外空的垂直路径这种情况,就几种大气模式,计算了对大气红外遥感有重要意义的近、中红外谱区(2—25 μm)的透过率。本文以图表形式给出所得结果的一部分。图1是1962年美国标准大气从三个不同高度到外空(即大气顶)垂直路径的透过率。图2是三种不同大气模式下从地面到外空垂直路径的透过率。图3是两种不同气溶胶衰减模式下中纬度夏季模式大气从地面到外空垂直路径的透过率。表1和表2给出了步长为 5cm^{-1} 的两个对从卫星上进行间接测温有用的红外谱区(4.3 μm $\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$ 吸收带和 15 μm CO_2 吸收带)的辐射在大气中的总透过率以及几种吸收剂所产生的分透过率。据此,可以明显地看出气象条件对近中、中红外谱区大气透过率的影响程度。不同的大气模式(主要是水汽、气溶胶)对用来探测大气温度垂直分布的两个最重要谱区(4.3 μm 带和 15 μm 带)影响不大。而对于用来探测地球表面特性的两个窗区(3.7—4.0 μm , 10.5—12.5 μm)影响颇大,比如,在中纬度夏季和中纬度冬季模式下,主要由于水汽含量的差异,在 10.5—12.5 μm 窗区的大气透过率之差达 0.35,在 3.7—4.0 μm 窗区,其差亦有 0.15。至于气溶胶,对窗区的大气透过率影响比较明显,比如,对于中纬度夏季的两种气溶胶模式(见图3和图4),在 3.7—4.0 μm 窗区的大气透过率之差可达 0.21,而在 10.5—12.5 μm 窗区,也有 0.13 这么大的差别。图1揭示了大气透过率随高度变化的趋势,在 10 km 以下,变化最大的是水汽吸收带(6.3 μm 和 18 μm),其次是两个窗区,这也间接地说明了气象上关于水汽主要集中在大气低层的结论。

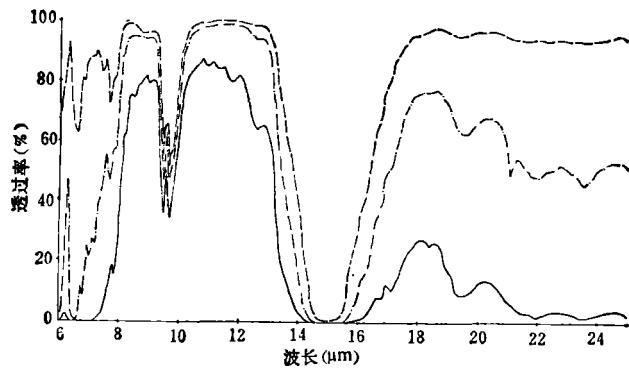
使用者根据自己的研究对象,利用这些以 5cm^{-1} 为步长的透过率,可以求出指定波数宽度内(一般来说,至少为 20cm^{-1})的平均透过率,这样的透过率,对大多数应用来说(主要

本文 1982 年 6 月 5 日收到。

* 杨建平同志参加了本文图表的绘制工作。



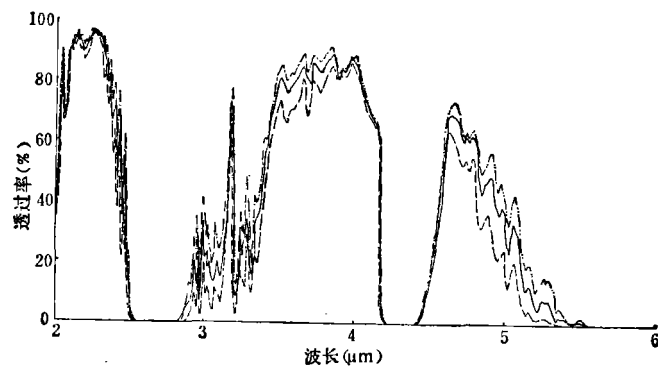
(a)



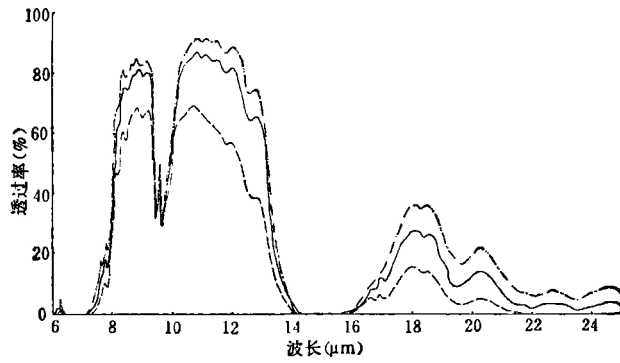
(b)

图1 1962年美国标准大气下从H1到外空垂直路径的透过率
(气溶胶模式: 边界层乡村型, 能见距离23km, 平流层本底型)

—— H1=0 km
 - · - · - H1=5 km
 - - - H1=10 km



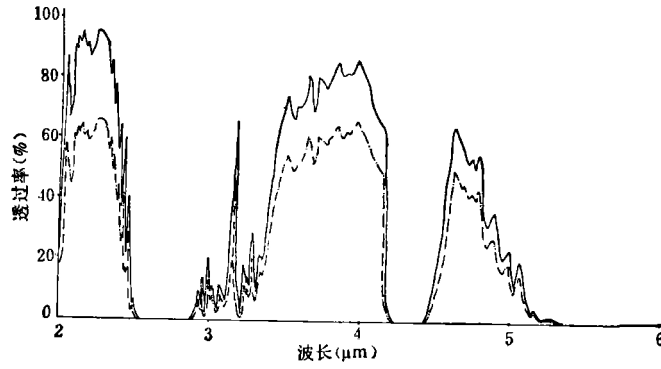
(a)



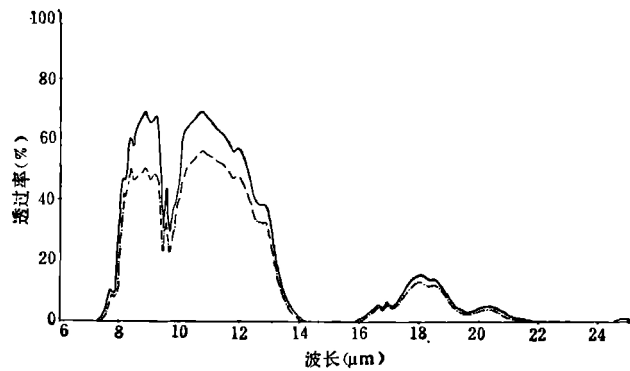
(b)

图2 三种大气模式下从地面到外空垂直路径下的大气透过率
(气溶胶模式: 边界层乡村型, 能见距离 23km 平流层本底型)

—— 1962 年美国标准大气
 - - - 中纬度夏季
 - · - 中纬度冬季



(a)



(b)

图3 中纬度夏季模式大气从地平面到外空垂直路径下气溶胶对透过率的影响

—— 边界层乡村型, 能见距离 23 km, 平流层本底型
 - · - 边界层乡村型, 能见距离 2 km, 平流层高强火山型

表1 1962年美国标准大气从海平面到外空垂直路径的大气透过率(15 μm CO₂ 吸收带)
(气溶胶模式为,边界层乡村型,能见距离23 km,平流层本底型)

波数 (cm ⁻¹)	波长 (μm)	总透 过率	水汽 透过率	均匀混合 气体透过率	臭氧 透过率	氮连续 透过率	水汽连续 透过率	分子散射 透过率	气溶胶 透过率	硝酸 透过率
560	17.8571	0.2653	0.3008	0.8952	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9853	1.0000
565	17.6991	0.2444	0.2883	0.8607	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	1.0000
570	17.5439	0.2091	0.2632	0.8066	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9846	1.0000
575	17.3913	0.1656	0.2284	0.7363	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9843	1.0000
580	17.2414	0.1245	0.1962	0.6449	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9840	1.0000
585	17.0940	0.1052	0.2082	0.5135	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9841	1.0000
590	16.9491	0.1199	0.2883	0.4224	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9844	1.0000
595	16.8067	0.0853	0.2879	0.3010	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9848	1.0000
600	16.6667	0.0880	0.4134	0.2161	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	0.9851	1.0000
605	16.5289	0.0706	0.4522	0.1584	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	0.9854	1.0000
610	16.3934	0.0478	0.4742	0.1023	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	0.9857	1.0000
615	16.2602	0.0283	0.4696	0.0612	0.9993	1.0000	1.0000	1.0000	0.9857	1.0000
620	16.1290	0.0160	0.4603	0.0353	0.9982	1.0000	1.0000	1.0000	0.9857	1.0000
625	16.0000	0.0076	0.4482	0.0172	0.9969	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
630	15.8730	0.0019	0.4522	0.0044	0.9952	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
635	15.7480	0.0	0.4649	0.0	0.9938	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
640	15.6250	0.0	0.5043	0.0	0.9922	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
645	15.5039	0.0	0.5907	0.0	0.9897	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
650	15.3846	0.0	0.6372	0.0	0.9869	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
655	15.2672	0.0	0.6701	0.0	0.9832	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	1.0000
660	15.1515	0.0	0.6865	0.0	0.9801	1.0000	1.0000	1.0000	0.9855	1.0000
665	15.0376	0.0	0.7104	0.0	0.9771	1.0000	1.0000	1.0000	0.9855	1.0000
670	14.9254	0.0	0.7068	0.0	0.9735	1.0000	0.7047	1.0000	0.9864	1.0000
675	14.8148	0.0	0.7104	0.0	0.9699	1.0000	0.7131	1.0000	0.9876	1.0000
680	14.7059	0.0	0.6995	0.0	0.9645	1.0000	0.7212	1.0000	0.9877	1.0000
685	14.5985	0.0	0.6602	0.0	0.9668	1.0000	0.7291	1.0000	0.9876	1.0000
690	14.4928	0.0	0.6064	0.0	0.9699	1.0000	0.7368	1.0000	0.9876	1.0000
695	14.3885	0.0	0.5830	0.0	0.9720	1.0000	0.7442	1.0000	0.9875	1.0000
700	14.2857	0.0006	0.5791	0.0015	0.9741	1.0000	0.7515	1.0000	0.9874	1.0000
705	14.1844	0.0019	0.6486	0.0040	0.9720	1.0000	0.7585	1.0000	0.9874	1.0000
710	14.0845	0.0087	0.7302	0.0164	0.9645	1.0000	0.7653	1.0000	0.9873	1.0000
715	13.9860	0.0258	0.7927	0.0445	0.9614	1.0000	0.7719	1.0000	0.9873	1.0000
720	13.8889	0.0474	0.8352	0.0768	0.9614	1.0000	0.7783	1.0000	0.9872	1.0000
725	13.7931	0.0804	0.8700	0.1238	0.9637	1.0000	0.7845	1.0000	0.9872	1.0000
730	13.6986	0.1061	0.8518	0.1654	0.9653	1.0000	0.7905	1.0000	0.9871	1.0000
735	13.6054	0.1348	0.8313	0.2122	0.9720	1.0000	0.7964	1.0000	0.9870	1.0000
740	13.5135	0.1715	0.8152	0.2718	0.9782	1.0000	0.8020	1.0000	0.9870	1.0000
745	13.4228	0.2063	0.7677	0.3437	0.9812	1.0000	0.8075	1.0000	0.9869	1.0000
750	13.3333	0.2896	0.8044	0.4563	0.9835	1.0000	0.8128	1.0000	0.9869	1.0000
755	13.2450	0.3841	0.8274	0.5831	0.9863	1.0000	0.8179	1.0000	0.9868	1.0000
760	13.1579	0.5023	0.8637	0.7242	0.9890	1.0000	0.8228	1.0000	0.9868	1.0000
765	13.0719	0.5729	0.8793	0.8045	0.9918	1.0000	0.8276	1.0000	0.9867	1.0000
770	12.9870	0.6209	0.8668	0.8777	0.9938	1.0000	0.8323	1.0000	0.9867	1.0000

表2 1962年美国标准大气从海平面到外空垂直路径的大气透过率(4.3 μm CO₂/N₂O吸收带)
(气溶胶模式同表1)

波数 (cm ⁻¹)	波长 (μm)	总透 过率	水汽 透过率	均匀混合 气体透过率	臭氧 透过率	氮连续 透过率	水汽连续 透过率	分子散射 透过率	气溶胶 透过率	硝酸 透过率
2170	4.6083	0.6532	0.8731	0.8152	0.9980	0.9381	1.0000	1.0000	0.9803	1.0000
2175	4.5977	0.6112	0.8820	0.7602	0.9977	0.9320	1.0000	1.0000	0.9802	1.0000
2180	4.5872	0.5166	0.8846	0.6449	0.9977	0.9259	1.0000	1.0000	0.9802	1.0000
2185	4.5767	0.4361	0.8860	0.5482	0.9981	0.9178	1.0000	1.0000	0.9802	1.0000
2190	4.5662	0.3726	0.8913	0.4697	0.9983	0.9098	1.0000	1.0000	0.9801	1.0000
2195	4.5558	0.3003	0.8926	0.3809	0.9987	0.9023	1.0000	1.0000	0.9801	1.0000
2200	4.5455	0.2526	0.8886	0.3244	0.9991	0.8949	1.0000	1.0000	0.9801	1.0000
2205	4.5351	0.2236	0.8793	0.2926	0.9993	0.8874	1.0000	1.0000	0.9800	1.0000
2210	4.5249	0.1880	0.8715	0.2503	0.9995	0.8799	1.0000	1.0000	0.9800	1.0000
2215	4.5147	0.1771	0.8762	0.2371	0.9996	0.8702	1.0000	1.0000	0.9800	1.0000
2220	4.5045	0.1498	0.8860	0.2006	0.9997	0.8606	1.0000	1.0000	0.9799	1.0000
2225	4.4944	0.1189	0.9004	0.1584	0.9998	0.8508	1.0000	1.0000	0.9799	1.0000
2230	4.4843	0.0901	0.9071	0.1206	0.9999	0.8411	1.0000	1.0000	0.9799	1.0000
2235	4.4743	0.0548	0.9060	0.0742	0.9999	0.8316	1.0000	1.0000	0.9798	1.0000
2240	4.4643	0.0307	0.8979	0.0424	0.9999	0.8221	1.0000	1.0000	0.9798	1.0000
2245	4.4543	0.0128	0.8873	0.0181	0.9999	0.8141	1.0000	1.0000	0.9798	1.0000
2250	4.4444	0.0067	0.8860	0.0096	1.0000	0.8062	1.0000	1.0000	0.9798	1.0000
2255	4.4346	0.0038	0.8873	0.0055	1.0000	0.7986	1.0000	1.0000	0.9797	1.0000
2260	4.4248	0.0016	0.8979	0.0023	1.0000	0.7910	1.0000	1.0000	0.9797	1.0000
2265	4.4150	0.0008	0.9094	0.0011	1.0000	0.7856	1.0000	1.0000	0.9797	1.0000
2270	4.4053	0.0	0.9162	0.0	1.0000	0.7803	1.0000	1.0000	0.9797	1.0000
2275	4.3956	0.0	0.9185	0.0	1.0000	0.7742	1.0000	1.0000	0.9797	1.0000
2280	4.3860	0.0	0.9259	0.0	1.0000	0.7681	1.0000	1.0000	0.9796	1.0000
2285	4.3764	0.0	0.9331	0.0	1.0000	0.7604	1.0000	1.0000	0.9796	1.0000
2290	4.3668	0.0	0.9396	0.0	1.0000	0.7528	1.0000	1.0000	0.9796	1.0000
2295	4.3573	0.0	0.9490	0.0	1.0000	0.7423	1.0000	1.0000	0.9796	1.0000
2300	4.3478	0.0	0.9538	0.0	1.0000	0.7319	1.0000	1.0000	0.9795	1.0000
2305	4.3384	0.0	0.9590	0.0	1.0000	0.7209	1.0000	1.0000	0.9795	1.0000
2310	4.3290	0.0	0.9614	0.0	1.0000	0.6759	1.0000	1.0000	0.9795	1.0000
2315	4.3197	0.0	0.9654	0.0	1.0000	0.6415	1.0000	1.0000	0.9795	1.0000
2320	4.3103	0.0	0.9703	0.0	1.0000	0.6088	1.0000	1.0000	0.9794	1.0000
2325	4.3011	0.0	0.9738	0.0	1.0000	0.5931	1.0000	1.0000	0.9794	1.0000
2330	4.2918	0.0	0.9757	0.0	1.0000	0.5760	1.0000	1.0000	0.9794	1.0000
2335	4.2827	0.0	0.9784	0.0	1.0000	0.5931	1.0000	1.0000	0.9794	1.0000
2340	4.2735	0.0	0.9819	0.0	1.0000	0.6108	1.0000	1.0000	0.9794	1.0000
2345	4.2644	0.0	0.9852	0.0	1.0000	0.6394	1.0000	1.0000	0.9793	1.0000
2350	4.2553	0.0	0.9871	0.0	1.0000	0.6693	1.0000	1.0000	0.9793	1.0000
2355	4.2463	0.0	0.9891	0.0	1.0000	0.6781	0.9963	1.0000	0.9793	1.0000
2360	3.2373	0.0	0.9902	0.0	1.0000	0.6848	0.9926	1.0000	0.9793	1.0000
2365	4.2283	0.0	0.9903	0.0	1.0000	0.6892	0.9889	1.0000	0.9792	1.0000
2370	4.2194	0.0	0.9911	0.0	1.0000	0.6938	0.9852	1.0000	0.9792	1.0000
2375	4.2105	0.0	0.9910	0.0	1.0000	0.6938	0.9815	1.0000	0.9792	1.0000
2380	4.2017	0.0018	0.9926	0.0027	1.0000	0.6960	0.9779	1.0000	0.9792	1.0000
2385	4.1929	0.0307	0.9936	0.0465	1.0000	0.6960	0.9742	1.0000	0.9792	1.0000
2390	4.1841	0.1153	0.9948	0.1757	1.0000	0.6938	0.9706	1.0000	0.9791	1.0000
2395	4.1754	0.2575	0.9958	0.3963	1.0000	0.6892	0.9670	1.0000	0.9791	1.0000
2400	4.1667	0.4504	0.9964	0.6931	1.0000	0.6915	0.9634	1.0000	0.9791	1.0000

是宽通道),是可以的。比如,美国 TIROS-N 气象卫星上的 AVHRR 通道 3(取波数范围为 2440—2900 cm^{-1}) 和通道 4(取波数范围为 760—1000 cm^{-1}) 的透过率就是采用 LOWTRAN 方法计算的^[3]。通道所占谱区的波数矩形子间隔分割型式如图 5 和图 6 所示。AVHRR 通道 3 或 4 的平均透过率 $\bar{\tau}$ 应为:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i \tau_i \phi_i}{\sum_i \phi_i},$$

其中, τ_i 是用 LOWTRAN 法计算出的第 i 个矩形子区间中心波数处的透过率, ϕ_i 是第 i 个矩形子区间的平均响应率, i 是矩形子区间序号。

LOWTRAN 法计算机编码程序能够计算波长在 0.25—28.5 μm 间的辐射在各种大气模式下(包括无线电探空资料或用户自定的大气廓线)不同光学路径的透过率,乃是以 5 cm^{-1} 为步长在 20 cm^{-1} 或 20 cm^{-1} 以上的波数间隔内的平均透过率。大气气体成分的光谱吸收系数资料取自文献 [1]。所采用的气溶胶衰减模式按高度分型,又考虑了当时天气状况、所在季节以及火山活动作用期等因素的影响^[9]。图 4 给出了图 3 中所采用的两种气溶胶衰减系数垂直分布模式。

透过率模式取为分子带吸收、硝酸吸收、分子散射、气溶胶削弱和分子连续吸收所产生的分透过率之乘积。其中分子带吸收包括均匀混合气体、水汽和臭氧等分子的吸收,而连续吸收含水汽和氮两种气体分子的连续吸收。上述几种吸收剂对辐射影响较大的谱区位置以及吸收系数特性如表 3 所示。

分子带吸收所产生的分透过率 τ_i , 以 Goody 模式和 Elsasser 模式的强弱线近似为基础,取下述的一般经验关系式:

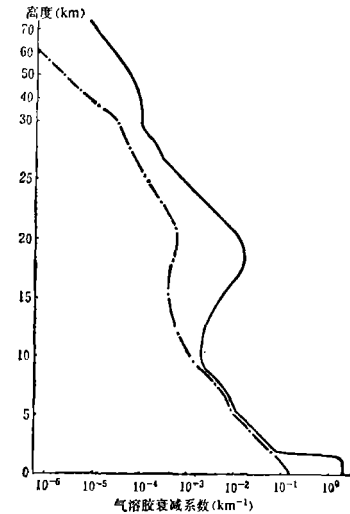


图 4 气溶胶衰减的两种垂直分布模式^[2]

- 边界层为乡村型, 能见距离 23 km, 平流层为本底型
- - - 边界层为乡村型, 能见距离为 2 km, 平流层为高强火山型

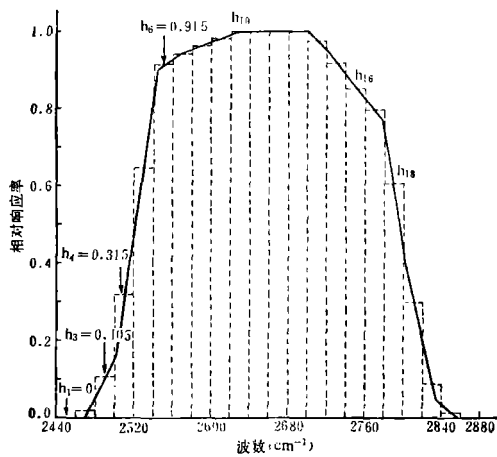


图 5 TIROS-N 卫星 AVHRR 通道 3 谱区的矩形子间隔

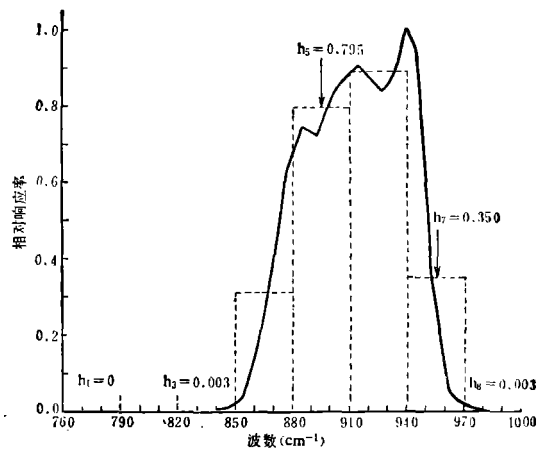


图 6 TIROS-N 卫星 AVHRR 通道 4 谱区的矩形子间隔

表3 大气气体成分的吸收特性

数值 吸收剂类型	参数 主要影响谱区 (cm ⁻¹)	吸收系数 c _v		
		单位	取值型式	取值范围
水汽吸收	350~14520	cm ² /gm	LOG ₁₀ (C _v)	-5.0~+5.0
均匀混合气体吸收	500~8070 13000~13245	km ⁻¹	LOG ₁₀ (C _v)	-5.0~+5.0
硝酸吸收	850~920, 1275~1350, 1675~1735,	(atm-cm) ⁻¹	C _v	0~30
臭氧吸收	575~3270	(atm-cm) ⁻¹	LOG ₁₀ (C _v)	-5.0~+3.0
	13000~23400	(atm-cm) ⁻¹	C _v	0.0~0.15
	27500~50000	(atm-cm) ⁻¹	C _v	0.0~300.0
水汽连续吸收	670~1350	cm ² /gm-atm	C _s ¹⁾	0~35
	2350~3000	cm ² /gm-atm	C _s ¹⁾	0.0~0.4
氮连续吸收	2080~2740	km ⁻¹	C _v	0.0~0.2
分子散射	3000~50000	km ⁻¹	C _v	0.0~1.0
气溶胶削弱	3270~27500	km ⁻¹	C _v	0.0~1.0

1) C_s 为在 296K 时的水汽连续吸收系数。

$$\tau_v = f(c_v \omega^*),$$

其中, c_v 是与波数有关的吸收系数, 由光谱曲线按 5 cm⁻¹ 步长数字化给出, ω* 是路径上等等效吸收剂含量。函数 f 的型式通过分子光谱理论和实验数据来确定。而 ω* 为:

$$\omega^* = \omega \left\{ \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \right\}^n DS,$$

其中, ω 是吸收剂密度, DS 是路径长度。带有下标 0 的量分别是对应于标准状态下的气压和温度, n 是经验常数, 对于水汽, n=0.9, 对于均匀混合气体, n=0.75, 对于臭氧, n=0.4。

其他四种吸收或削弱所产生的分透过率服从简单的指数规律:

$$\tau_v = \exp \{-c_v \omega^*\}.$$

那末, 总的透过率 τ_v(总) 为:

$$\tau_v(\text{总}) = \tau_v(\text{分子带吸收}) * \tau_v(\text{硝酸吸收}) * \tau_v(\text{连续吸收}) * \tau_v(\text{分子散射}) * \tau_v(\text{气溶胶削弱})$$

其中, τ_v(分子带吸收) = τ_v(均匀混合气体) * τ_v(水汽) * τ_v(臭氧),

$$\tau_v(\text{连续吸收}) = \tau_v(\text{水汽连续}) * \tau_v(\text{氮连续}).$$

参 考 文 献

- [1] Kneizys F. X. et al., AFGL-TR-80-0067, (1980).
- [2] Shettle E. P. et al., AD-A-028615, (1976).
- [3] Michael P. Weinreb et al., NOAA TR NESS 80, (1980).

ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE IN 2~25 μm SPECTRAL REGIONS

WANG QINMO

(Satellite Meteorological Center, CMB)

ABSTRACT

After a brief description of the atmospheric transmittance computing programme used in ref. [1] and now reduced by the author, he gives out some results of atmospheric transmittance in 2~25 μm spectral regions. Preliminary analyses are given also.