

大 气 光 学 性 质

R. A. McClatchey 等

中国科学院大气物理研究所一室译

大 气 光 学 性 质

R.A.McClatchey 等

• 本报告系 R.A.McClatchey 等人所写的大气光学性质(Optical Properties of the Atmosphere)一文的第三版(AD—753075)由中国科学院大气物理所一室部分同志译出。

摘 要

这个报告给出了一系列的图和表,根据这些图表就可以确定地球大气中任何两点之间的透过率。这个资料是建立在从热带到极区的五个大气模式和二个气溶胶模式的基础上。选择了一组激光频率,对这些频率给出了单色透过率值。为了予报低分辨率的透过率,作出了一系列的图,这些图能够用来予报分辨率为 20厘米^{-1} 的透过率。本文还包括了关于散射太阳辐射,红外发射,折射效应以及云、雾的衰减各节。

本报告是早先同一题目报告(McClatchey, et al, 1970)的第三版,虽然随后二版是为适应需要而出版,但也借此机会作了一些小的修改、订正和增加,第三版与另二版不同之处是对均匀混合气体和水汽的短波区域的低分辨率光谱曲线进行了修正,总的精度亦有所增进;更重要的是增加了附录B,它给出了模式大气资料以及对应1962年美国标准大气的等效海平面路径资料。

目 录

1. 引言	(1)
2. 在光学计算中所用的模式大气	(1)
2.1 标准模式大气	(1)
2.2 均匀混合气体的浓度	(7)
2.3 气溶胶分布	(7)
3. 大气透过率基础	(10)
4. 选择频率上的大气透过率	(12)
4.1 激光频率表	(12)
4.2 散射和吸收系数	(12)
4.3 内插方法	(13)
5. 0.25到25微米低分辨率的大气透过率	(26)
5.1 大气窗区连续吸收	(26)
5.2 谱带模式方法概述	(27)
5.3 等效常压路径和吸收物质含量	(29)
5.4 预报图的说明和使用	(31)
5.5 0.25到0.75微米区域中的吸收	(32)
5.6 低分辨率透过率计算的精度	(32)
6. 散射太阳辐射和红外发射	(33)
6.1 晴天和云天的透射和反射天空辐射强度	(33)
6.2 大气的红外发射	(34)
7. 大气中的折射效应	(35)
8. 云雾对大气辐射的影响	(37)
附录A: 单位和转换因子	(38)
附录B: 美国1962年标准大气的等效海平面路径图	(40)
参考文献	(42)

图 目

1. 气溶胶模式的归一化粒子大小分布.....	(46)
2. 水平大气路径情况下, 水汽等效海平面路径长度对高度的函数.....	(47)
3. 垂直大气路径情况下, 水汽等效海平面路径长度对高度的函数.....	(48)
4. 水平大气路径情况下, 均匀分布的混合气体的等效海平面路径长度对高度的函数.....	(49)
5. 垂直大气路径情况下, 均匀分布的混合气体的等效海平面路径长度对高度的函数.....	(50)
6. 水平大气路径情况下, 臭氧等效海平面路径长度对高度的函数.....	(51)
7. 垂直大气路径情况下, 臭氧等效海平面路径长度对高度的函数.....	(52)
8. 水平大气路径情况下, 氮气等效海平面路径长度对高度的函数.....	(53)
9. 垂直大气路径情况下, 氮气等效海平面路径长度对高度的函数.....	(54)
10. 水平大气路径情况下, 水汽连续吸收等效海平面路径长度对高度的函数.....	(55)
11. 垂直大气路径情况下, 水汽连续吸收等效海平面路径长度对高度的函数.....	(56)
12. 水平大气路径情况下, 分子散射等效海平面路径长度对高度的函数.....	(57)
13. 垂直大气路径情况下, 分子散射等效海平面路径长度对高度的函数.....	(58)
14. 水平大气路径情况下, 气溶胶衰减等效海平面路径长度对高度的函数.....	(59)
15. 垂直大气路径情况下, 气溶胶衰减等效海平面路径长度对高度的函数.....	(60)
16a 水汽透过率预报图(0.6—4.0微米).....	(61)
16b 水汽透过率预报图(4—26微米).....	(62)
17a 均匀混合气体(CO_2 , N_2O , CO , CH_4 , O_3)透过率预报图(0.76—4.5微米).....	(63)
17b 均匀混合气体(CO_2 , N_2O , CO , CH_4)透过率预报图(4.5—19微米).....	(64)
18a 臭氧(O_3)透过率预报图(3—6.4微米).....	(65)
18b 臭氧(O_3)透过率预报图(8—18微米).....	(66)
19. 氮气透过率预报图.....	(67)
20. 水汽连续吸收引起的透过率预报图.....	(68)
21. 分子散射引起的衰减预报图.....	(69)

22. 气溶胶透过率(散射和吸收)预报图	(70)
23. 水平大气路径情况下, 臭氧(0.25—0.75微米)等效海平面路径长度对高度的函数	(71)
24. 垂直大气路径情况下, 臭氧(0.25—0.75微米)等效海平面路径长度对高度的函数	(72)
25. 臭氧透过率(0.25—0.75微米)预报图	(73)
26. 根据2.3节所述模式气溶胶和空气的归一化散射相函数	(74)
27. 用Monte Carlo方法计算得到的向上(a)和向下(b)辐照	(75)
28. 密雨层云情况下向下(a)和向上(b)辐照	(76)
29. 水面, 雪, 干燥土壤和植物的典型反射率	(77)
30. 根据中纬度冬季模式的温度分布计算得到的辐照与波长的函数	(78)
31. 晴朗的天顶天空辐照	(79)
32. 相对大气质量 $[M(\theta)]$ 和类似量 $[M_w(\theta)]$ 作为天顶角函数的比较	(80)
33. 晴天积云引起的衰减和波长的函数	(81)
34. 晴天积云模式的粒子大小分布	(82)
A ₁ . 一公里路径长度上的水汽含量与温度和相对湿度的函数	(83)
B ₁ . 水平大气路径情况下, 水汽等效海平面路径长度的高度分布	(84)
B ₂ . 垂直大气路径情况下, 水汽等效海平面路径长度的高度分布	(85)
B ₃ . 水平大气路径情况下, 均匀混合气体等效海平面路径长度的高度分布	(86)
B ₄ . 垂直大气路径情况下, 均匀混合气体等效海平面路径长度的高度分布	(87)
B ₅ . 水平大气路径情况下, 臭氧等效海平面路径长度的高度分布	(88)
B ₆ . 垂直大气路径情况下, 臭氧等效海平面路径长度的高度分布	(89)
B ₇ . 水平大气路径情况下, 氮气等效海平面路径长度的高度分布	(90)
B ₈ . 垂直大气路径情况, 氮气等效海平面路径长度的高度分布	(91)
B ₉ . 水平大气路径情况下, 水汽连续吸收等效海平面路径长度的高度分布	(92)
B ₁₀ . 垂直大气路径情况下, 水汽连续吸收等效海平面路径长度的高度分布	(93)
B ₁₁ . 水平大气路径情况下, 分子散射等效海平面路径长度的高度分布	(94)
B ₁₂ . 垂直大气路径情况下, 分子散射等效海平面路径长度的高度分布	(95)
B ₁₃ . 水平大气路径情况下, 臭氧(0.25—0.75微米)等效海平面路径长度的高度分布	(96)
B ₁₄ . 垂直大气路径情况下, 臭氧(0.25—0.75微米)等效海平面路径长度的高度分布	(97)

大气光学性质

1. 引言

这个报告的目的是提供资料,从这些资料可以确定在给定的大气模式中沿着某一路径上的辐射衰减或发射,所涉及的光谱区是从0.25到25微米。对100公里以上的大气不予考虑,因为那里的大气质量还不到总的大气质量的百万分之一。

我们规定了五种模式大气,它们有各自的温度、压力和吸收气体的浓度。此外,还规定了两个气溶胶模式,这样,实际上在利用未经内插的资料时就有十种模式可供选择。然而,所叙述的内插的方法可供使用者得到中间条件大气的光学资料。

如同想得到所有的大气模式是不可能的一样,要在一个简短的报告中提供任何光谱分辨率资料也是不可能的。因此,我们被迫把高分辨率的计算只限于几个特定的波长。为此,选择了一个激光波长表,我们尽力挑选在实际应用中和作为研究工具方面经常用到的那些激光器。除了激光束透过率表之外,我们还以图解的形式提供了一个在整个光谱区分辨率约为 20厘米^{-1} 的大气吸收和散射的计算方法。这些方法适合于低分辨透过率计算,如果用于估计激光在大气中的传输将会产生严重的误差,适用于激光传输的高分辨率曲线发表在其他一些报告中(McClatchey, 1971 and McClatchey & Selby, 1972)。

在第二节中定义的模式大气与在第五节中介绍的低分辨率的吸收计算方法一起,用来计算大于5微米波长的向宇宙空间发射的辐射和天空背景辐射(第6节)。所谓天空背景辐射就是在地面看天空所观测到的辐射。较短波长的向空间的辐射和天空背景辐射是太阳天顶角和观测角度的复杂函数。因此只给出几个特殊的例子。

折射率对几何路径长度的影响和云、雾对辐射衰减的影响分别在第七节和第八节中加以讨论。

2. 光学计算中所用的模式大气

2.1 标准模式大气

在表1中介绍了五个模式大气。其压力、温度、密度、水汽浓度是取自1962年美国标准大气和《地球物理和空间环境手册》中的补充大气,臭氧浓度引自《地球物理和空间环境手册》第六章(Valley, 1965),在11公里以上的水汽密度取自Sissenwine等(1968)的资料,单位和变换的讨论见附录A。

表1—1用于计算大气光学性质的模式大气
热带大气(北纬15度)

高度 (公里)	气 压 (毫巴)	温 度 (°K)	密 度 (克/米 ³)	水 汽 (克/米 ³)	臭 氧 (克/米 ³)
0	1.013E+03	300.0	1.167E+03	1.9E+01	5.6E-05
1	9.040E+02	294.0	1.064E+03	1.3E+01	5.6E-05
2	8.050E+02	288.0	9.689E+02	9.3E+00	5.4E-05
3	7.150E+02	284.0	8.756E+02	4.7E+00	5.1E-05
4	6.330E+02	277.0	7.951E+02	2.2E+00	4.7E-05
5	5.590E+02	270.0	7.199E+02	1.5E+00	4.5E-05
6	4.920E+02	264.0	6.501E+02	8.5E-01	4.3E-05
7	4.320E+02	257.0	5.855E+02	4.7E-01	4.1E-05
8	3.780E+02	250.0	5.258E+02	2.5E-01	3.9E-05
9	3.290E+02	244.0	4.708E+02	1.2E-01	3.9E-05
10	2.860E+02	237.0	4.202E+02	5.0E-02	3.9E-05
11	2.470E+02	230.0	3.740E+02	1.7E-02	4.1E-05
12	2.130E+02	224.0	3.316E+02	6.0E-03	4.3E-05
13	1.820E+02	217.0	2.929E+02	1.8E-03	4.5E-05
14	1.560E+02	210.0	2.578E+02	1.0E-03	4.5E-05
15	1.320E+02	204.0	2.260E+02	7.6E-04	4.7E-05
16	1.110E+02	197.0	1.972E+02	6.4E-04	4.7E-05
17	9.370E+01	195.0	1.676E+02	5.6E-04	6.9E-05
18	7.890E+01	199.0	1.382E+02	5.0E-04	9.0E-05
19	6.660E+01	203.0	1.145E+02	4.9E-04	1.4E-04
20	5.650E+01	207.0	9.515E+01	4.5E-04	1.9E-04
21	4.800E+01	211.0	7.938E+01	5.1E-04	2.4E-04
22	4.090E+01	215.0	6.645E+01	5.1E-04	2.8E-04
23	3.500E+01	217.0	5.618E+01	5.4E-04	3.2E-04
24	3.000E+01	219.0	4.763E+01	6.0E-04	3.4E-04
25	2.570E+01	221.0	4.045E+01	6.7E-04	3.4E-04
30	1.220E+01	232.0	1.831E+01	3.6E-04	2.4E-04
35	6.000E+00	243.0	8.600E+00	1.1E-04	9.2E-05
40	3.050E+00	254.0	4.181E+00	4.3E-05	4.1E-05
45	1.590E+00	265.0	2.097E+00	1.9E-05	1.3E-05
50	8.540E-01	270.0	1.101E+00	6.3E-06	4.3E-06
70	5.790E-02	219.0	9.210E-02	1.4E-07	8.6E-08
100	3.000E-04	210.0	5.000E-04	1.0E-09	4.3E-11

表 1—2

中纬度夏季(北纬45度, 7月分)

高度 (公里)	气 压 (毫巴)	温 度 (°K)	密 度 (克/米 ³)	水 汽 (克/米 ³)	臭 氧 (克/米 ³)
0	1.013E+03	294.0	1.191E+03	1.4E+01	6.0E-05
1	9.020E+02	290.0	1.080E+03	9.3E+00	6.0E-05
2	8.020E+02	285.0	9.757E+02	5.9E+00	6.0E-05
3	7.100E+02	279.0	8.846E+02	3.3E+00	6.2E-05
4	6.280E+02	273.0	7.998E+02	1.9E+00	6.4E-05
5	5.540E+02	267.0	7.211E+02	1.0E+00	6.6E-05
6	4.870E+02	261.0	6.487E+02	6.1E-01	6.9E-05
7	4.260E+02	255.0	5.830E+02	3.7E-01	7.5E-05
8	3.720E+02	248.0	5.225E+02	2.1E-01	7.9E-05
9	3.240E+02	242.0	4.669E+02	1.2E-01	8.6E-05
10	2.810E+02	235.0	4.159E+02	6.4E-02	9.0E-05
11	2.430E+02	229.0	3.693E+02	2.2E-02	1.1E-04
12	2.090E+02	222.0	3.269E+02	6.2E-03	1.2E-04
13	1.790E+02	216.0	2.882E+02	1.8E-03	1.5E-04
14	1.530E+02	216.0	2.464E+02	1.0E-03	1.8E-04
15	1.300E+02	216.0	2.104E+02	7.6E-04	1.9E-04
16	1.110E+02	216.0	1.797E+02	6.4E-04	2.1E-04
17	9.500E+01	216.0	1.535E+02	5.6E-04	2.4E-04
18	8.120E+01	216.0	1.305E+02	5.0E-04	2.8E-04
19	6.950E+01	217.0	1.110E+02	4.9E-04	3.2E-04
20	5.950E+01	218.0	9.453E+01	4.5E-04	3.4E-04
21	5.100E+01	219.0	8.056E+01	5.1E-04	3.6E-04
22	4.370E+01	220.0	6.872E+01	5.1E-04	3.6E-04
23	3.760E+01	222.0	5.867E+01	5.4E-04	3.4E-04
24	3.220E+01	223.0	5.014E+01	6.0E-04	3.2E-04
25	2.770E+01	224.0	4.288E+01	6.7E-04	3.0E-04
30	1.320E+01	234.0	1.322E+01	3.6E-04	2.0E-04
35	6.520E+01	245.0	6.519E+00	1.1E-04	9.2E-05
40	3.330E+01	258.0	3.330E+00	4.3E-05	4.1E-05
45	1.760E+01	270.0	1.757E+00	1.9E-05	1.3E-05
50	9.510E-01	276.0	9.512E-01	6.3E-06	4.3E-06
70	6.710E-02	218.0	6.706E-02	1.4E-07	8.6E-08
100	3.000E-04	210.0	5.000E-04	1.0E-09	4.3E-11

表 1—3

中纬度冬季（北纬45度、1月分）

高度 (公里)	气 压 (毫巴)	温 度 (°K)	密 度 (克/米 ³)	水 汽 (克/米 ³)	臭 氧 (克/米 ³)
0	1.018E+03	272.2	1.301E+03	3.5E+00	6.0E-05
1	8.973E+02	268.7	1.162E+03	2.5E+00	5.4E-05
2	7.897E+02	265.2	1.037E+03	1.8E+00	4.9E-05
3	6.938E+02	261.7	9.230E+02	1.2E+00	4.9E-05
4	6.081E+02	255.7	8.282E+02	6.6E-01	4.9E-05
5	5.313E+02	249.7	7.411E+02	3.8E-01	5.8E-05
6	4.627E+02	243.7	6.614E+02	2.1E-01	6.4E-05
7	4.016E+02	237.7	5.886E+02	8.5E-02	7.7E-05
8	3.473E+02	231.7	5.222E+02	3.5E-02	9.0E-05
9	2.992E+02	225.7	4.619E+02	1.6E-02	1.2E-04
10	2.568E+02	219.7	4.072E+02	7.5E-03	1.6E-04
11	2.199E+02	219.2	3.496E+02	6.9E-03	2.1E-04
12	1.882E+02	218.7	2.999E+02	6.0E-03	2.6E-04
13	1.610E+02	218.2	2.572E+02	1.8E-03	3.0E-04
14	1.378E+02	217.7	2.206E+02	1.0E-03	3.2E-04
15	1.178E+02	217.2	1.890E+02	7.6E-04	3.4E-04
16	1.007E+02	216.7	1.620E+02	6.4E-04	3.6E-04
17	8.610E+01	216.2	1.388E+02	5.6E-04	3.9E-04
18	7.350E+01	215.7	1.188E+02	5.0E-04	4.1E-04
19	6.280E+01	215.2	1.017E+02	4.9E-04	4.3E-04
20	5.370E+01	215.2	8.690E+01	4.5E-04	4.5E-04
21	4.580E+01	215.2	7.421E+01	5.1E-04	4.3E-04
22	3.910E+01	215.2	6.338E+01	5.1E-04	4.3E-04
23	3.340E+01	215.2	5.415E+01	5.4E-04	3.9E-04
24	2.860E+01	215.2	4.621E+01	6.0E-04	3.6E-04
25	2.430E+01	215.2	3.950E+01	6.7E-04	3.4E-04
30	1.110E+01	217.4	1.783E+01	3.6E-04	1.9E-04
35	5.180E+00	227.8	7.924E+00	1.1E-04	9.2E-05
40	2.530E+00	243.2	3.625E+00	4.3E-05	4.1E-05
45	1.290E+00	258.5	1.741E+00	1.9E-05	1.3E-05
50	6.820E-01	265.7	8.954E+00	6.3E-06	4.3E-06
70	4.670E-02	230.7	7.051E+00	1.4E-07	8.6E-08
100	3.000E-04	210.2	5.000E-04	1.0E-09	4.3E-11

表 1—4

亚北极夏季(北纬60度、7月分)

高度 (公里)	气 压 (毫巴)	温 度 (°K)	密 度 (克/米 ³)	水 汽 (克/米 ³)	臭 氧 (克/米 ³)
0	1.010 E+03	287.0	1.220 E+03	9.1 E+00	4.9 E-05
1	8.960 E+02	282.0	1.110 E+03	6.0 E+00	5.4 E-05
2	7.929 E+02	276.0	9.971 E+02	4.2 E+00	5.6 E-05
3	7.000 E+02	271.0	8.985 E+02	2.7 E+00	5.8 E-05
4	6.160 E+02	266.0	8.077 E+02	1.7 E+00	6.0 E-05
5	5.410 E+02	260.0	7.244 E+02	1.0 E+00	6.4 E-05
6	4.730 E+02	253.0	6.519 E+02	5.4 E-01	7.1 E-05
7	4.130 E+02	246.0	5.849 E+02	2.9 E-01	7.5 E-05
8	3.590 E+02	239.0	5.231 E+02	1.3 E-01	7.9 E-05
9	3.107 E+02	232.0	4.663 E+02	4.2 E-02	1.1 E-04
10	2.677 E+02	225.0	4.142 E+02	1.5 E-02	1.3 E-04
11	2.300 E+02	225.0	3.559 E+02	9.4 E-03	1.8 E-04
12	1.977 E+02	225.0	3.059 E+02	6.0 E-03	2.1 E-04
13	1.700 E+02	225.0	2.630 E+02	1.8 E-03	2.6 E-04
14	1.460 E+02	225.0	2.260 E+02	1.0 E-03	2.8 E-04
15	1.250 E+02	225.0	1.943 E+02	7.6 E-04	3.2 E-04
16	1.080 E+02	225.0	1.671 E+02	6.4 E-04	3.4 E-04
17	9.280 E+01	225.0	1.436 E+02	5.6 E-04	3.9 E-04
18	7.980 E+01	225.0	1.235 E+02	5.0 E-04	4.1 E-04
19	6.860 E+01	225.0	1.062 E+02	4.9 E-04	4.1 E-04
20	5.890 E+01	225.0	9.128 E+01	4.5 E-04	3.9 E-04
21	5.070 E+01	225.0	7.849 E+01	5.1 E-04	3.6 E-04
22	4.360 E+01	225.0	6.750 E+01	5.1 E-04	3.2 E-04
23	3.750 E+01	225.0	5.805 E+01	5.4 E-04	3.0 E-04
24	3.227 E+01	226.0	4.963 E+01	6.0 E-04	2.8 E-04
25	2.780 E+01	228.0	4.247 E+01	6.7 E-04	2.6 E-04
30	1.340 E+01	235.0	1.338 E+01	3.6 E-04	1.4 E-04
35	6.610 E+00	247.0	6.614 E+00	1.1 E-04	9.2 E-05
40	3.400 E+00	262.0	3.404 E+00	4.3 E-05	4.1 E-05
45	1.810 E+00	274.0	1.817 E+00	1.9 E-05	1.3 E-05
50	9.870 E-01	277.0	9.868 E-01	6.3 E-06	4.3 E-06
70	7.070 E-02	216.0	7.071 E-02	1.4 E-07	8.6 E-08
100	3.000 E-04	210.0	5.000 E-04	1.7 E-09	4.3 E-11

表 1—5

亚北极冬季(北纬度60度、1月分)

高度 (公里)	气 压 (毫巴)	温 度 (°K)	密 度 (克/米 ³)	水 汽 (克/米 ³)	臭 氧 (克/米 ³)
0	1.013E+03	257.1	1.372E+03	1.2E+00	4.1E-05
1	8.878E+02	259.1	1.193E+03	1.2E+00	4.1E-05
2	7.775E+02	255.9	1.058E+03	9.4E-01	4.1E-05
3	6.798E+02	252.7	9.366E+02	6.8E-01	4.3E-05
4	5.932E+02	247.7	8.339E+02	4.1E-01	4.5E-05
5	5.158E+02	240.9	7.457E+02	2.0E-01	4.7E-05
6	4.467E+02	234.1	6.646E+02	9.8E-02	4.9E-05
7	3.853E+02	227.3	5.904E+02	5.4E-02	7.1E-05
8	3.308E+02	220.6	5.226E+02	1.1E-02	9.0E-05
9	2.829E+02	217.2	4.538E+02	8.4E-03	1.6E-04
10	2.418E+02	217.2	3.879E+02	5.5E-03	2.4E-04
11	2.067E+02	217.2	3.315E+02	3.8E-03	3.2E-04
12	1.776E+02	217.2	2.834E+02	2.6E-03	4.3E-04
13	1.510E+02	217.2	2.422E+02	1.8E-03	4.7E-04
14	1.291E+02	217.2	2.071E+02	1.0E-03	4.9E-04
15	1.103E+02	217.2	1.770E+02	7.6E-04	5.6E-04
16	9.431E+01	216.6	1.517E+02	6.4E-04	6.2E-04
17	8.058E+01	216.0	1.300E+02	5.6E-04	6.2E-04
18	6.882E+01	215.4	1.113E+02	5.0E-04	6.2E-04
19	5.875E+01	214.8	9.529E+01	4.9E-04	6.0E-04
20	5.014E+01	214.1	8.155E+01	4.5E-04	5.6E-04
21	4.277E+01	213.6	6.976E+01	5.1E-04	5.1E-04
22	3.647E+01	213.0	5.966E+01	5.1E-04	4.7E-04
23	3.109E+01	212.4	5.100E+01	5.4E-04	4.3E-04
24	2.649E+01	211.8	4.358E+01	6.0E-04	3.6E-04
25	2.256E+01	211.2	3.722E+01	6.7E-04	3.2E-04
30	1.020E+01	216.0	1.645E+01	3.6E-04	1.5E-04
35	4.701E+00	222.2	7.368E+00	1.1E-04	9.2E-05
40	2.243E+00	234.7	3.330E+00	4.3E-05	4.1E-05
45	1.113E+00	247.0	1.569E+00	1.9E-05	1.3E-05
50	5.719E-01	259.3	7.682E-01	6.3E-06	4.3E-06
70	4.016E-02	245.7	5.695E-02	1.4E-07	8.6E-08
100	3.000E-04	210.0	5.000E-04	1.0E-09	4.3E-11

2.2 均匀混合气体的浓度

表2是供读者用来确定在任何水平和垂直路径中,所有均匀混合气体的浓度所需要的资料。表中第三列给出了各种气体的浓度。单位是按体积算为百万分之几。第四列给出了穿过整层大气垂直路径上的气体总含量。第五列是海平面一公里的路径中气体的 $(\text{cm-atm})_{\text{s.t.p}}$ 数,而任何其他高度上水平路径中的 $(\text{cm-atm})_{\text{s.t.p}}$ 数由方程(1)给出

$$(\text{cm-atm})_{\text{s.t.p}} = L \left(\frac{P P_m}{10} \right) \left(\frac{P T_0}{P_0 T} \right) \quad (1)$$

这里L是路径长度,单位是公里, P_0 和 T_0 表示标准状态的压力和温度($P_0 = 1$ 个大气压, $T_0 = 273\text{K}$),第六列给出了这样的值,大气中任何两个压力层之间的气体含量可以由这些表列的值乘以毫巴为单位的压力增加量(ΔP),再乘以 $\sec\theta$ 来得到(见附录),这里 θ 是天顶角。

2.3 气溶胶分布

两种气溶胶模式(表3)分别描述了相应于地面能见度为23公里的“晴朗”大气(“clear” atmosphere)和地面能见度为5公里的“雾霾”大气(“hazy” atmosphere)。这两种模式的气溶胶粒子大小分布函数在所有的高度上是相同的。并且类似于Deirmendjian(1963)对大陆性霾提出的分布函数(图1)。数密度 $[n(r)]$ 和粒子半径 r 之间的关系为:

$$\begin{aligned} \frac{n(r)}{\Delta r} &= C_1 r^{-4} & (0.1\mu < r < 10\mu) \\ \frac{n(r)}{\Delta r} &= C_1 10^4 & (0.02\mu < r < 0.1\mu) \\ \frac{n(r)}{\Delta r} &= 0 & (r < 0.02\mu \text{ 和 } r > 10.0\mu) \end{aligned} \quad (2)$$

它们与Deirmendjian模式“C”不同,大粒子的截止边从5微米伸展到10微米,用 $\Delta r = 1$ 微米和 $C_1 = 0.883 \times 10^{-3}$ 使这个分布函数归一化(图1),也就是在整个尺度范围内的积分成为1。为了得到大气中任何高度的实际的大小分布,只需要把表3中的N值乘上这归一化的大小分布函数。

对于 $\lambda \leq 0.6$ 微米的光谱区,气溶胶粒子的折射率假定为实数(即没有吸收)。对 $\lambda > 0.6$ 微米的光谱区,气溶胶粒子的折射率的虚数部分(即吸收部分)假定是随波长线性增加,直到 $\lambda \geq 2$ 微米时为0.1。这个折射率的模式是基于VolZ(1957)所做的测量。

表3中“晴朗”大气的单位体积中气溶胶粒子的总数N已被调整,使得在波长 $\lambda = 0.55$ 微米处的总消光系数与Elterman(1968, 1970)大气衰减模式中每个高度上所用的值相一致。这个模式相应于地面能见度约为23公里的大气条件。“雾霾”模式与“晴朗”模式在 $H \geq 5$ 公里的高度上是一样的。对 $H < 5$ 公里,气溶胶粒子的总数按指数增加,直到地面上气溶胶粒子的数值与地面能见度约为5公里的值相一致。

表 2 均匀混合气体浓度

成分	分子数	体 积 比 (百万分之几)	整层大气垂直路径 (厘米—大气) _{TP}	海平面上水平路径 (厘米—大气) _{STP} /公里	单位压力气体含量 克·厘米 ⁻² /毫巴
空 气	28.97	10 ⁶	8 × 10 ⁵	10 ⁶	1.02
CO ₂	44	330	264	33	5.11 × 10 ⁻⁴
N ₂ O	44	0.28	0.22	0.028	4.34 × 10 ⁻⁷
CO	28	0.075	0.06	0.0075	7.39 × 10 ⁻⁶
CH ₄	16	1.6	1.28	0.16	9.01 × 10 ⁻⁷
O ₃	32	2.095 × 10 ⁶	1.68 × 10 ⁵	2.095 × 10 ⁴	0.236

表3 气溶胶模式——“晴朗”和“霾雾”大气粒子垂直分布

高 度 (公里)	粒 子 数 N (个/厘米 ³)	
	能 见 度 23 公 里 晴 朗	能 见 度 5 公 里 霾 雾
0	2.828E+03	1.378E+04
1	1.244E+03	5.030E+03
2	5.371E+02	1.844E+03
3	2.256E+02	6.731E+02
4	1.192E+02	2.453E+02
5	8.987E+01	8.987E+01
6	6.337E+01	6.337E+01
7	5.890E+01	5.890E+01
8	6.069E+01	6.069E+01
9	5.818E+01	5.818E+01
10	5.675E+01	5.675E+01
11	5.317E+01	5.317E+01
12	5.585E+01	5.585E+01
13	5.156E+01	5.156E+01
14	5.048E+01	5.048E+01
15	4.744E+01	4.744E+01
16	4.511E+01	4.511E+01
17	4.458E+01	4.458E+01
18	4.314E+01	4.314E+01
19	3.634E+01	3.634E+01
20	2.667E+01	2.667E+01
21	1.933E+01	1.933E+01
22	1.455E+01	1.455E+01
23	1.113E+01	1.113E+01
24	8.826E+00	8.826E+00
25	7.429E+00	7.429E+00
30	2.238E+00	2.238E+00
35	5.890E-01	5.890E-01
40	1.550E-01	1.550E-01
45	4.082E-02	4.082E-02
50	1.078E-02	1.078E-02
70	5.550E-05	5.550E-05
100	1.969E-08	1.969E-08

3. 大气透过率基础

由于大气中的吸收、散射系数与大气的若干物理特性有关 (Goody 1964), 所以大气中辐射透过率是复杂的。一般说来, 对于沿着大气一个路径上的单色辐射透过率, 存在

$$\tau = \exp(-\gamma \Delta L) \quad (3)$$

其中 γ 是衰减系数; ΔL 是辐射所通过的路径长度。衰减系数 (γ) 由下式给出:

$$\gamma = \sigma + K \quad (4)$$

其中, σ 是散射系数; K 是吸收系数。这两个系数的单位都是 Km^{-1} 。方程(3)只是应用于单色辐射才是严格正确的。

由方程(4)定义的散射系数和吸收系数与大气路径上的分子和气溶胶二者都有关。当电磁辐射入射到分子或气溶胶时, 则辐射的一部分被吸收, 而其余部分向所有方向散射。于是, 给出如下定义:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \quad (4a)$$

$$K = k_m + k_a \quad (4b)$$

式中脚标 m 和 a 分别表示分子和气溶胶。在本报告中我们尽力提供方程(4a)和(4b)中这四个量的数据。

分子散射系数仅仅依赖于辐射路径上的分子数密度, 而分子吸收系数不仅是吸收气体总量的函数, 而且是气体局地温度和压力的函数。分子散射 (即瑞利散射) 与波长的关系很接近于: $\sigma_m \sim \lambda^{-4}$ 。分子吸收系数随波长的变化更为复杂, 由于许多分子吸收带的出现, 它们随波长的关系是一个很强的振荡函数。这些带的复杂性极大部分取决于少数几个大气成分, 它们是 (以重要性为序): H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、 O_2 、 CH_4 、 N_2 。除 H_2O 和 O_3 外其他这些分子都假定按体积均匀混合。

量 σ_a 和 K_a 与气溶胶的数密度、大小分布以及它们的复折射指数有关, 根据 Mie (1908) 理论, 对于球形粒子 (和另外一些简单形状的粒子) 可推导出被吸收的辐射总量和散射光的分布。辐射随散射角 ϕ 的分布能表示为

$$i(\phi) = I_0 \frac{\lambda_2}{4\pi^2} \left[\frac{i_1(\phi) + i_2(\phi)}{2} \right] \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \times \frac{\text{厘米}^2}{\text{球面度}} \right) \quad (5)$$

这里, i_1 和 i_2 表示散射辐射的两个偏振分量 (Van de Halst, 1957), 它们是粒子大小和波长的比值、粒子的折射率以及散射角 ϕ 的函数。 I_0 是入射辐射的强度。如果单位散射体积分内存在大小分布为 $n(r)$ 的 N 个粒子, 则用积分

$$\int_{\mathbf{r}} i_{1,2}(\mathbf{r}) n(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

代替 i_1 和 i_2 , 从而得到一个单位体积粒子云射向单位立体角的积分角散射强度 $I(\phi)$ 。

积分 $\int_0^{4\pi} I(\phi) d\Omega$ 为散射辐射的总量, 也等于 $I_0 \times \sigma_a$ 。方程(5)能写成

$$I(\phi) = I_0 \sigma F(\phi) \quad (6)$$

其中, $F(\phi)$ 是归一化的散射函数, 其积分 $\int_0^{4\pi} F(\phi) d\Omega = 1$ 。

图26表示分子散射的归一化散射函数(与波长无关)以及第2、3节中所述的气溶胶模式下两个波长的气溶胶散射的归一化函数 $F(\phi)$ 。气溶胶粒子的吸收系数 K_a 能够象散射系数 σ_a 那样来定义。由于气溶胶存在着一个粒子大小的分布, 其吸收和散射系数通常是波长的平滑函数。

在50公里以下大气中对于单一谱线的分子吸收系数能很精确的给出:

$$K_a(\nu) = \frac{S \alpha}{\pi[(\nu - \nu_0)^2 + \alpha^2]} \quad (7)$$

式中, S 为谱线强度; α 为谱线的半宽度; ν_0 为谱线的中心频率; ν 是吸收系数所处的频率。 ν 和 λ 之间的关系参看附录。半宽度与压力、温度的关系近似于下式:

$$\alpha \cong \alpha_0 \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (8)$$

谱线强度通过波尔兹曼因子和配分函数与温度相关 (Goody, 1964; Penner, 1959)。在50公里以上, 需要考虑多普勒加宽 (Goody, 1964)。

让我们考虑一种平面平行大气和某一个频率一种或多种分子的若干谱线均对该频率的吸收系数有贡献的情况。在任一(j)层, 分子吸收系数由下式给出:

$$K_{mj} = \sum_i K_{mji} \quad (9)$$

式中, i 是对各种吸收成分的所有分子吸收谱线求和, 这些谱线很接近对方程(9)中的总分子吸收系数有明显的贡献的频率 ν 。引入由方程(4a)和(4b)所定义的分光散射(σ_m)、气溶胶吸收(K_a)和散射(σ_s), 就可以给出(j)层总的衰减系数

$$\gamma_j = k_{mj} + \sigma_{mj} + K_{aj} + \sigma_{sj} \quad (10)$$

于是, 根据方程(3)通过(j)层大气的透射率即为:

$$T(\nu) = \exp\left(-\sum_j \gamma_j \Delta L_j\right) \quad (11)$$

注意, 方程(11)中的 ΔL 不一定表示垂直距离。对于斜程透射率很容易得到, 只要把 ΔL 写成

$$\Delta L_j = (\Delta Z_j) \sec \theta$$

即可, 其中 ΔZ_j 表示垂直距离上的增量。在此情况下, 方程(11)变成

$$T_M(\nu) = [T(\nu)]^M \quad (12)$$

式中, $M = \sec \theta$ 是垂直方向和观测方向之间夹角的正割。这就很方便地把垂直透射率转