

对 NOAA/ AVHRR 通道反照率和 植被指数的大气影响订正试验

李 昕

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 在利用大气窗区进行遥感时, 大气成分对辐射的吸收和散射作用造成辐射削弱, 从而影响气象卫星 (AVHRR) 两个通道 (可见光和近红外) 反演地表反照率值及其差和比的植被指数值。在选取实测卫星资料对其作预处理并考虑仪器定标衰减作用后, 利用 LOWTRAN-7 大气辐射传输模式对卫星资料进行大气订正的探讨, 指出气溶胶、水汽等大气参数是订正计算中的敏感因子。

关键词 气象卫星 甚高分辨率辐射仪 植被指数 大气辐射传输模式 定标

1 引言

全球变暖引起的生态环境的变化是当代国际社会关心的问题, 作为 NOAA/ AVHRR 产品之一的归一化植被指数已成为环境监测中的重要参数。但由于在利用大气窗区进行遥感时, 大气成分对辐射的吸收和散射作用造成辐射削弱, 从而影响 AVHRR 可见光和近红外通道的反演得到的反照率及其各种组合^[1]。为了清除这种影响, 更精确得到植被指数值, 对于大气的削弱作用应进行必要的修正即所谓的“大气影响订正”。近年来, 在此方面, 开展了广泛的研究, 然究其问题的复杂性, 难以获得理论计算中所需的每个象元的精确大气状况信息, 目前仍处于研究阶段^[2]。本文运用 LOWTRAN-7 大气辐射传输模式, 选取实时卫星资料, 试图对由 AVHRR 两个通道辐射测量得到的植被指数进行了大气影响订正, 并对某些大气参数在订正计算中的敏感性作了简单的探讨。此外, 本文还对 NOAA/ AVHRR 仪器衰减问题加以考虑, 且给以校正。

2 AVHRR 可见光、近红外通道仪器衰减校正

实时接收到的 AVHRR/ HRPT 资料, 经过定标等预处理, 把星上仪器测量的计数值反演为物理量^[3], 但由于可见光探测仪 AVHRR 通道 1、2 等是在发射前的实验里做定标的, 而可见光感应器的性能随时间的推移而降低, 这样对于 NOAA/ AVHRR 可见光通道资料的使用者来说, 是需要考虑定标校正的。

2.1 AVHRR 通道 1、2 的灵敏度

图 1a、b 是 NOAA 卫星 AVHRR 通道 1、2 的敏感性随时间变化情况^[4]。由图可见, 其敏感性自发射后是逐渐降低的, 其中 NOAA-11 上 AVHRR 灵敏度变化较大。

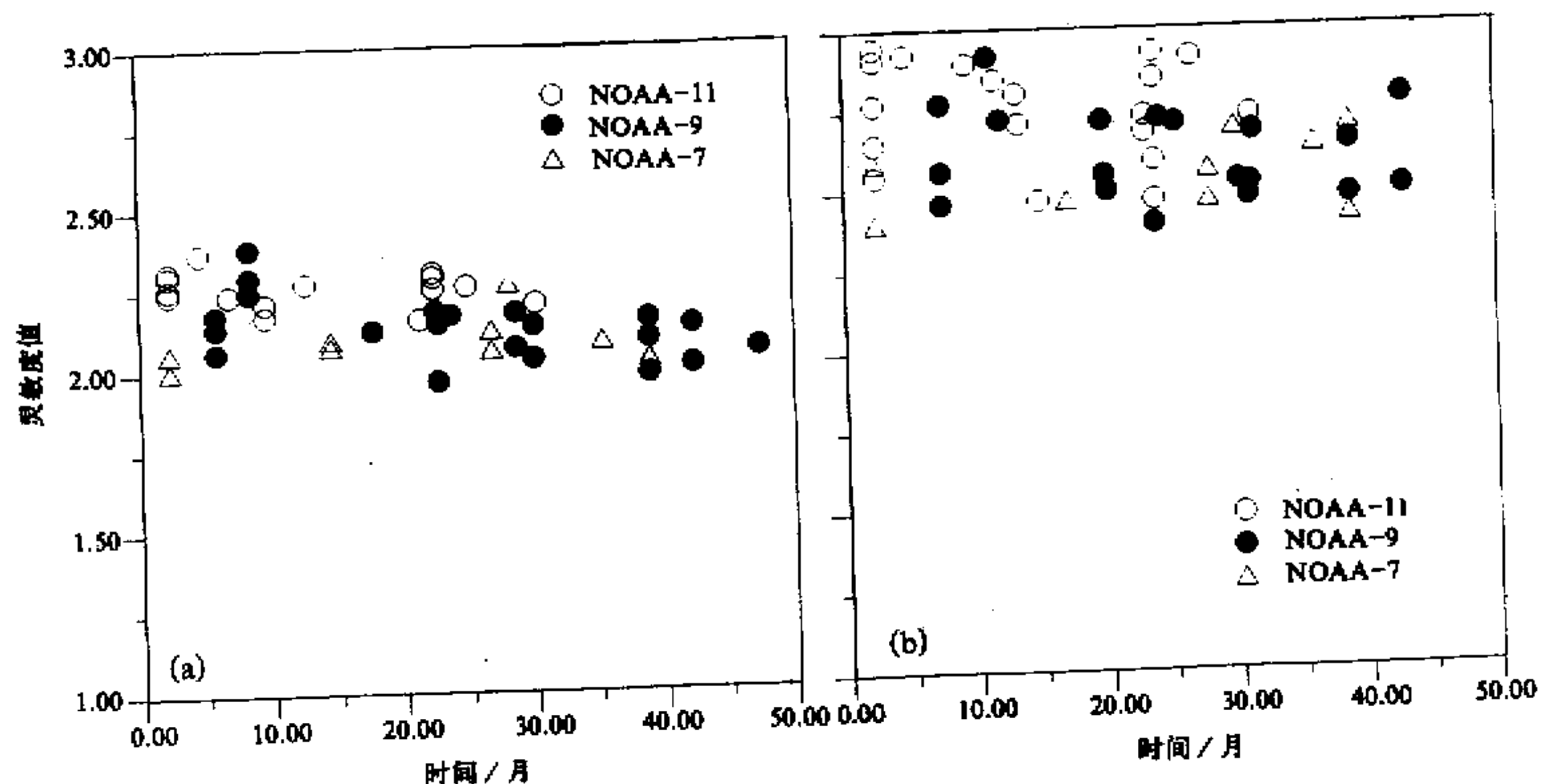


图 1 NOAA 卫星 AVHRR 通道的敏感性变化图
(a) 通道 1; (a) 通道 2

2.2 仪器衰减校正方法

发射后灵敏度值校正的方法有许多, 本文采用文献[4]的方法 (表 1)。结果表明 AVHRR 可见光、近红外通道衰减程度的不同, 对于植被指数这一量值是极其有影响的^[5]。

表 1 灵敏值公式				$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
通道数	遥感仪器名称	发射日期	发射前灵敏值	灵敏值校正公式
1	NOAA-7	1981-06-23	1.88	$1.707-6.425 \times 10^{-3} \times \text{月}$
	NOAA-9	1984-12-12	1.95	$1.752-6.425 \times 10^{-3} \times \text{月}$
	NOAA-11	1988-09-24	2.04	$1.864-6.425 \times 10^{-3} \times \text{月}$
2	NOAA-7	1981-06-23	2.88	$2.411-2.167 \times 10^{-3} \times \text{月}$
	NOAA-9	1984-12-12	2.86	$2.411-2.167 \times 10^{-3} \times \text{月}$
	NOAA-11	1988-09-24	3.32	$2.725-8.250 \times 10^{-3} \times \text{月}$

3 大气影响订正试验方法

对卫星资料进行大气订正是个较为复杂的问题, 尤其大气光学特性在订正非稳定影响问题中是个难以确定的因素。目前, 大气影响订正用于业务上仅仅是对卫星反演的海洋颜色的订正。本文利用理论模式选取卫星实测资料及常规气象资料, 试图对卫星反演

的陆地表面物理量(地表反照率、植被指数)进行大气影响订正试验,计算证明大气参数影响的存在,并对其进行订正。

3.1 理论模式

本文采用了美国空军地球物理实验室(AFGL)编写的地球辐射传输模式LOWTRAN-7,其具有多次散射的计算及新的带模式臭氧和氧气在紫外的吸收参数,考虑了连续吸收、分子、气溶胶、云、雨的散射和吸收、地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响^[6],其主要理论依据是大气辐射传输理论。

3.1.1 辐射传输方程

单色光在大气中的辐射传输方程为

$$\frac{dI_v(r)}{dr} = K'_{ve}\rho[J_v(r) - I_v(r)] = K_{ve}[J_v(r) - I_v(r)], \quad (1)$$

其中, r 为位置变量, I_v 是辐射强度或辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), K'_{ve} 是质量衰减系数, K_{ve} 是体衰减系数, J_v 是源函数。

对于红外辐射,

$$J_v(r) = [1 - W(r)]B_v, \quad (2)$$

其中, $W = K_{vs} / K_{ve}$ 为单次散射反照率, B_v 为 Planck 函数, 有散射时,

$$J_v(r) = \frac{W(r)}{4\pi} \int_{4\pi} P(r, \Omega, \Omega') I(r, \Omega') d\Omega' + J_{vs}(r) P(r, \Omega, \Omega_0), \quad (3)$$

P 是散射函数, J_{vs} 是此位置上透射直射太阳辐射。

对于平面平行大气, 引入大气光学厚度

$$\tau = \int_0^Z K_{ve} dZ. \quad (4)$$

普遍的边界条件是

$$I_v(\varphi, \mu) = \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \pi F_0, \quad (5)$$

$$I_v(\tau_1, \mu) = \varepsilon(\mu) B_v(T_s) + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \rho_1(\mu, \varphi_0 - \mu, \varphi), \quad (6)$$

$$I_v(\tau_1, -\mu', \varphi') \mu' d\mu' + \frac{\mu_0}{\pi} \pi F_0 \exp(-\tau_1 / \mu_0) \rho_d(\mu, \varphi, -\mu_0, \varphi_0), \quad (7)$$

其中, πF_0 为大气顶部太阳辐照度, τ_1 为整层大气光学厚度, ε 为地表发射率, T_s 为地表温度, ρ_d 为地表双向反射系数。

3.1.2 吸收和散射、相函数

散射在所有波上都出现, 位于电磁波传播路径上的粒子通过散射从入射波里连续提取能量, 并将此能量向各方向重新辐射出去。

介质的散射性质可由如下参数描述^[6]:

(1) 体散射系数

$$K_s = n_r Q_{sr} + \int n_m(a) Q_{sm}(a) da = \int B(\theta, \varphi) dw, \quad (8)$$

其中, Q_{sr} 、 Q_{sm} 分别为分子和气溶胶散射截面, 质量散射系数 $K'_s = K_s / \rho_s$, 这里 ρ_s 为散射体密度, n_r 为数密度。

(2) 散射相函数

$$P(\theta, \varphi) = B(\theta, \varphi) / Q_s. \quad (9)$$

对粒子群, 散射相函数

$$P(\theta) = \frac{1}{K_s} \int n(a) Q_s(a) P(a, \theta) da, \quad (10)$$

其中, $n(a)$ 是粒子尺度谱, K_s 是散射系数, Q_s 是散射截面。

当辐射能入射到介质上或通过介质传输时, 它的全部或一部分传输给了介质, 这一过程叫吸收。吸收伴随着介质物理状态的改变, 对大气而言, 重要的是温度或内能的改变。描述介质吸收性质的量为: (1) 体吸收函数 $K_{sa} = \rho K'_{sa}$; (2) 质量吸收系数 K'_{sa} 。

3.2 计算方法

基于上述辐射传输理论, 利用大气辐射传输模式 LOWTRAN-7, 给出所选区域的初始经纬度, 以 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 大小搜索象元, 读取符合选取要求点的卫星资料, 反演卫星的位置, 判断选取像元靠近的气象台站, 输入地面、探空的常规气象资料于模式中作为实际大气模式, 以卫星观测反演的反照率作为模式中地表反照率迭代初值, 计算出辐射值, 然后与卫星观测反演的辐射值作比较, 反复改变模式中地表反射率值, 直至卫星观测反演的辐射值与模式计算出的辐射值的相对误差小于 1%, 即认为此时给定的模式中地表反射率为通道 1 或通道 2 的实际地表反射率亦是经大气影响订正后通道反射率值, 然后用下式计算植被指数 I_{ndv} :

$$I_{ndv} = \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1} \times 20, \quad (11)$$

其中, B_1 、 B_2 为通道 1、2 的反射率值。

4 算例结果分析与讨论

本文选取 1992 年 NOAA-11/AVHRR 春、夏、秋三季的三天晴空卫星资料在小区域进行大气影响订正试验, 并以此为例做出分析。表 2~4 是计算部分结果, 其中, I_{ndv} 为植被指数, B_1 为通道 1 反射率, B_2 为通道 2 反射率, LAT 为点地理纬度, LONG 为点地理经度, SATLAT 为卫星的纬度, SATLONG 为卫星的经度, SATZEN 为卫星探测角, PATHAZI 为路径方位角, SUNZEN 为太阳高度角, 第二行 (AFTER DO L7) 为经 LOWTRAN-7 订正后的数值, 3 台站指北京台站。

4.1 结果分析

表 2 为 7 月 4 日卫星第 1、2 通道的反射率 (4 km 分辨率) 经 LOWTRAN-7 订正后的结果及 I_{ndv} 值, 表中列出各点的地理经纬度、卫星位置、探测角、路径方位角、太阳天顶角等数值。这一小范围的大气模式采用北京气象站探空曲线及地面常规资料。分

表 2 1992 年 7 月 4 日 7 时 8 分

I_{ndv}	B_1	B_2	LAT	LONG	SATLAT	SATLONG	SATZEN	PATHAZI	SUNZEN
10	0.086	0.278	40.300	116.000	39.396	108.717	35.630	78.712	41.253
19	0.005	0.370			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
10	0.085	0.273	40.300	116.040	39.395	702.000	35.830	78.712	41.325
16	0.039	0.362			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
10	0.083	0.277	40.300	116.080	39.388	108.691	36.020	78.714	41.393
20	0.001	0.370			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.087	0.254	40.300	116.120	39.385	108.673	36.220	78.714	41.471
19	0.006	0.331			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.094	0.245	40.300	116.160	39.379	108.662	36.410	78.715	41.536
18	0.017	0.317			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.104	0.246	40.300	116.200	39.375	108.648	36.540	78.716	41.603
16	0.031	0.318			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.094	0.253	40.300	116.240	39.369	108.634	36.740	78.717	41.673
18	0.017	0.330			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.093	0.260	40.300	116.280	39.365	108.622	36.930	78.717	41.744
18	0.015	0.342			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.098	0.247	40.300	116.320	39.359	108.604	37.130	78.718	41.813
17	0.022	0.320			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.092	0.257	40.300	116.360	39.355	108.587	37.290	78.719	41.884
18	0.014	0.337			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.090	0.268	40.300	116.400	39.350	108.571	37.480	78.720	41.956
19	0.011	0.355			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.095	0.266	40.300	116.440	39.345	108.559	37.610	78.721	42.000
18	0.018	0.351			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.101	0.264	40.300	116.480	39.343	108.543	37.820	78.721	42.000
17	0.024	0.345			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
10	0.087	0.282	40.260	116.000	39.359	108.734	35.600	78.718	41.236
19	0.006	0.378			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
9	0.090	0.264	40.260	116.040	39.355	108.720	35.780	78.719	41.307
19	0.011	0.348			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.096	0.253	40.260	116.080	39.350	108.707	35.960	78.720	41.377
18	0.020	0.330			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.102	0.253	40.260	116.120	39.345	108.695	36.150	78.721	41.447
17	0.028	0.330			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
8	0.104	0.247	40.260	116.160	39.341	108.680	36.350	78.721	41.519
16	0.031	0.320			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				

表 3 1992 年 10 月 11 日 7 时 26 分

I_{adv}	B_1	B_2	LAT	LONG	STALAT	SATLONG	SATZEN	PATHAZI	SUNZEN
5	0.145	0.253	40.300	116.000	39.225	106.513	42.340	78.740	68.000
16	0.037	0.299			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.148	0.267	40.300	116.040	39.216	106.489	42.510	78.742	68.000
15	0.042	0.327			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.148	0.280	40.300	116.080	39.215	106.468	42.680	78.742	68.000
16	0.042	0.353			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.139	0.244	40.300	116.120	39.209	106.448	42.830	78.743	68.002
16	0.027	0.281			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.145	0.264	40.300	116.160	39.205	106.424	43.010	78.743	68.039
16	0.037	0.321			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.157	0.296	40.300	116.200	39.203	106.404	43.150	78.744	68.093
15	0.056	0.385			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.160	0.310	40.300	116.240	39.195	106.381	43.280	78.745	68.156
15	0.061	0.413			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.156	0.295	40.300	116.280	39.195	106.360	43.460	78.745	68.210
15	0.055	0.383			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.156	0.284	40.300	116.320	39.187	106.340	43.620	78.746	68.268
15	0.063	0.361			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.161	0.303	40.300	116.360	39.185	106.312	43.750	78.747	68.329
15	0.063	0.399			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.160	0.297	40.300	116.400	39.183	106.294	43.890	78.747	68.382
15	0.061	0.387			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.161	0.290	40.300	116.440	39.175	106.277	44.030	78.748	68.435
14	0.063	0.373			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.159	0.279	40.300	116.480	39.175	106.245	44.220	78.748	68.502
14	0.060	0.351			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.142	0.244	40.260	116.000	39.185	106.531	42.290	78.747	68.000
16	0.032	0.281			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.143	0.247	40.260	116.040	39.177	106.508	42.480	78.748	68.000
16	0.033	0.287			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.152	0.277	40.260	116.080	39.175	106.448	42.620	78.748	68.000
15	0.048	0.347			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.155	0.290	40.260	116.120	39.171	106.465	42.780	78.749	60.000
15	0.053	0.373			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.153	0.284	40.260	116.160	39.165	106.441	42.950	78.750	68.028
15	0.050	0.361			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				

表 4 1992 年 4 月 23 日 6 时 25 分

I_{adv}	B_1	B_2	LAT	LONG	SATLAT	SATLONG	SATLONG	PATHAZI	SUNZEN
4	0.087	0.145	40.300	116.000	40.735	118.754	15.200	258.485	41.795
8	0.069	0.159			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.086	0.144	40.300	116.040	40.726	118.750	14.950	258.487	41.888
8	0.068	0.158			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.079	0.139	40.300	116.080	40.719	118.745	14.710	258.488	41.981
9	0.059	0.151			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.081	0.146	40.300	116.120	40.712	118.742	14.520	258.489	42.000
9	0.061	0.160			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.092	0.164	40.300	116.160	40.703	118.736	14.270	258.491	42.000
8	0.075	0.184			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.104	0.188	40.300	116.200	40.695	118.730	14.030	258.492	42.000
8	0.091	0.213			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.096	0.177	40.300	116.240	40.686	118.725	13.800	258.494	42.000
8	0.080	0.200			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.094	0.178	40.300	116.280	40.679	118.722	13.530	258.495	42.000
9	0.078	0.201			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.104	0.190	40.300	116.320	40.672	118.717	13.280	258.496	42.000
8	0.091	0.216			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.096	0.184	40.300	116.360	40.665	118.715	13.100	258.497	42.000
9	0.080	0.208			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.087	0.177	40.300	116.400	40.656	118.709	12.850	258.499	42.000
10	0.069	0.200			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.089	0.181	40.300	116.440	40.648	118.705	12.610	258.500	41.982
10	0.072	0.205			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
7	0.094	0.197	40.300	116.480	40.642	118.701	12.420	258.501	41.977
10	0.077	0.223			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
4	0.090	0.148	40.260	116.000	40.696	118.768	15.260	258.492	41.766
8	0.073	0.163			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
4	0.092	0.150	40.260	116.040	40.689	118.763	15.020	258.493	41.858
8	0.075	0.166			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.090	0.152	40.260	116.080	40.682	118.758	14.770	258.494	41.956
8	0.073	0.168			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
5	0.097	0.166	40.260	116.120	40.673	118.752	14.580	258.496	41.999
7	0.082	0.186			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				
6	0.102	0.191	40.260	116.160	40.665	118.748	14.340	258.497	42.000
8	0.088	0.217			AFTER DO L7, STATION NO. IS 3				

析表 2, 可以看出, 通道 1 卫星测得行星反照率值在 8%~14% 左右, 经过订正后, 迭代得出的地面反照率要小, 其值在 0.5%~8% 左右。通道 2 卫星测得行星反照率值大, 均在 20%~28% 左右, 经订正后的地面反照率值在 24%~38% 左右, 大于行星反照率, 比较 I_{ndv} 值, 订正后得出的 I_{ndv} 值一般要比未经订正的值大很多。分析 7 月 4 日的气象资料: 此地区地面能见度为 8 km, 表明大气透明度差, 气溶胶光学厚度为 0.5, 参看图 2 可知, 在气溶胶光学厚度为 0.5 时, 其反射率可达 0.06 (天底观测, 太阳天顶角为 60°)。但气溶胶对于两个通道行星反射率大小的影响还取决于地表反射率本身值及此时太阳天顶角。其对于 I_{ndv} 值的影响, 则使之在茂密植被地区减小了 0.00~0.20 (表 5) [7]。

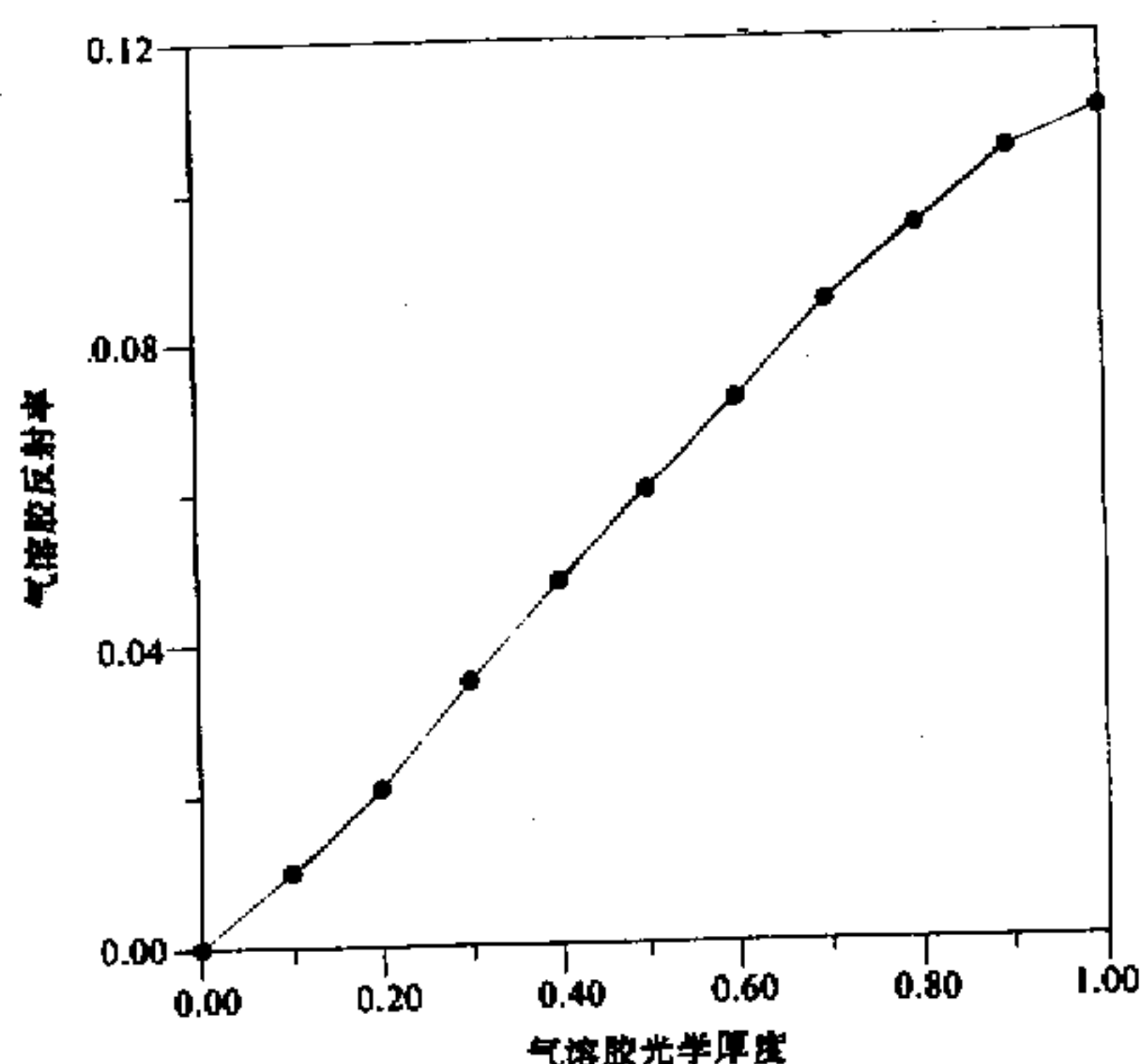


图 2 作为光学厚度函数的气溶胶反射率
太阳天顶角为 50° , 天底观测, 气溶胶是大陆性模式

表 5 两个通道反射率和植被指数的大气影响的总结

	通道 1	通道 2
臭氧	以 5%~15% 减少反射率	没有影响
分子散射	对稀少植被地区, 以 0.00~0.03 增加植被指数	
	以 0.02~0.07 增加反射率	以 0.005~0.025 增加反射率
	对茂密植被地区, 以 0.00~0.01 减少植被指数	
气溶胶	对中浓度霾, 以 0.02~0.08 增加反射率, 对高浑浊度, 以 0.10~0.15 增加反射率	与通道 1 影响相同
	对植被茂密地区, 以 0.00~0.20 减少植被指数	
水汽	以 0%~5% 减少反射率	以 10%~30% 减少反射率
	对稀少植被地区, 以 0.01~0.10 减少植被指数	

这天地面相对湿度为 33%, 空气中水汽含量 (以水汽的工程气压单位表示) 约为 1.8 g/cm^2 。据文献[7]中结果: 水汽对于两个通道均有影响, 当水汽量为 2 g/cm^2 左右时 (相对空气质量为 3.0), 通道 2 的水汽透射函数为 0.85 左右, 而对于通道 1 影响不大 (透射函数为 0.98), 水汽的吸收, 使得两个通道的行星反射率比地表反射率小, 尤其对于通道 2 的影响更为显著, 使得其行星反射率比地表反射率减小 10%~30%。对于 I_{ndv} 值的影响, 在稀少植被地区, 使它减小 0.01~0.10 (表 5)。

臭氧是以 LOWTRAN-7 辐射传输模式中中纬度夏季模式给定, 为 123 Du, 据文献[7], 臭氧对于通道 2 没有影响, 对通道 1 影响较大, 但对于 120 Du 的 O_3 含量来说, 通道 1 的透射函数为 0.98, 影响是不大的。

7 月 4 日这天的探测角约为 37° 左右, 太阳天顶角为 41° 左右, 探测路径偏长, 分

子散射作用会增加, 分子散射对于两个通道的影响与气溶胶散射影响作用相同, 与地表反射率大小相关。对茂密植被地区来说, 分子散射使得 I_{ndv} 减少 0.00~0.10 (表 5)。

综合上述天气影响, 利用 LOWTRAN-7 对两个通道探测值进行订正。订正后, 通道 1 的反照率的确比未订正的值要小 6%~7%左右, 通道 2 的反照率比订正前大 4%~10%左右。由上述分析也可看出, 对于两个通道反射率值造成影响的大气因子, 主要是气溶胶、分子散射和水汽。臭氧含量较低, 影响不大。经过这样订正后的 I_{ndv} 值比未经订正的值大 7~10 个单位。与文献[7]中分析的大气影响结果基本趋于一致。同时也发现, 经过订正后, 通道 1 和通道 2 反射率值减小量和增加量并非是每个大气因子影响量的迭加。

表 3 是 10 月 11 日的结果, 与 7 月 4 日比较, 经过订正后, 通道 2 的反射率值比 7 月 4 日通道 2 订正后值要小。根据图 3 可知, 植物生长茂盛, 叶面积越大, 叶绿素的量就越多, 对 AVHRR 通道 2 所对应波长光的反射也越多。10 月 11 日, 已是中秋, 植被开始枯萎, 叶面积变小, 叶绿素含量降低, 光合作用变弱, 因此 10 月 11 日通道 2 的反射值普遍比 7 月 4 日反射值小。而对于通道 1, 情况则相反, 叶绿素含量高, 对可见光 (通道 1) 吸收强, 反射值也就小。7 月 4 日通道 1 订正后的反射值的确比 10 月 11 日通道 1 订正后的值小。

10 月 11 日的地面能见度为 20 km, 气溶胶光学厚度为 0.3, 参看图 2, 其反射率为 0.03 (天底观测, 太阳天顶角为 60°) [7]。这天地面相对湿度为 31%, 空气中水汽含量 0.7 g/cm^3 , 通道 2 的水汽透射函数为 0.92。臭氧与 7 月 4 日相同为 120 Du。对于两个通道影响不大。比较表 3 与表 2, 10 月 11 日, 太阳高度角比较大约 68° , 卫星过境时间为北京时 15:26, 探测角为 43° 。与 7 月 4 日比较, 探测路径长, 路径上散射作用大, 说明大气影响作用强。综合以上大气因子的影响, 经过订正后, 通道 1 的反射率由未订正的 14%~19%, 减小到 2.5%~10%, 通道 2 的反射率由订正前的 25%~30% 增加到 28%~40%。这样两个通道的反射率差值订正后比订正前增大了。分析表 3 的 I_{ndv} 值, 经过订正后的 I_{ndv} 值比未经过订正的值大 9~11 个单位, 但比表 2 中 7 月 4 日订正后的 I_{ndv} 值小。

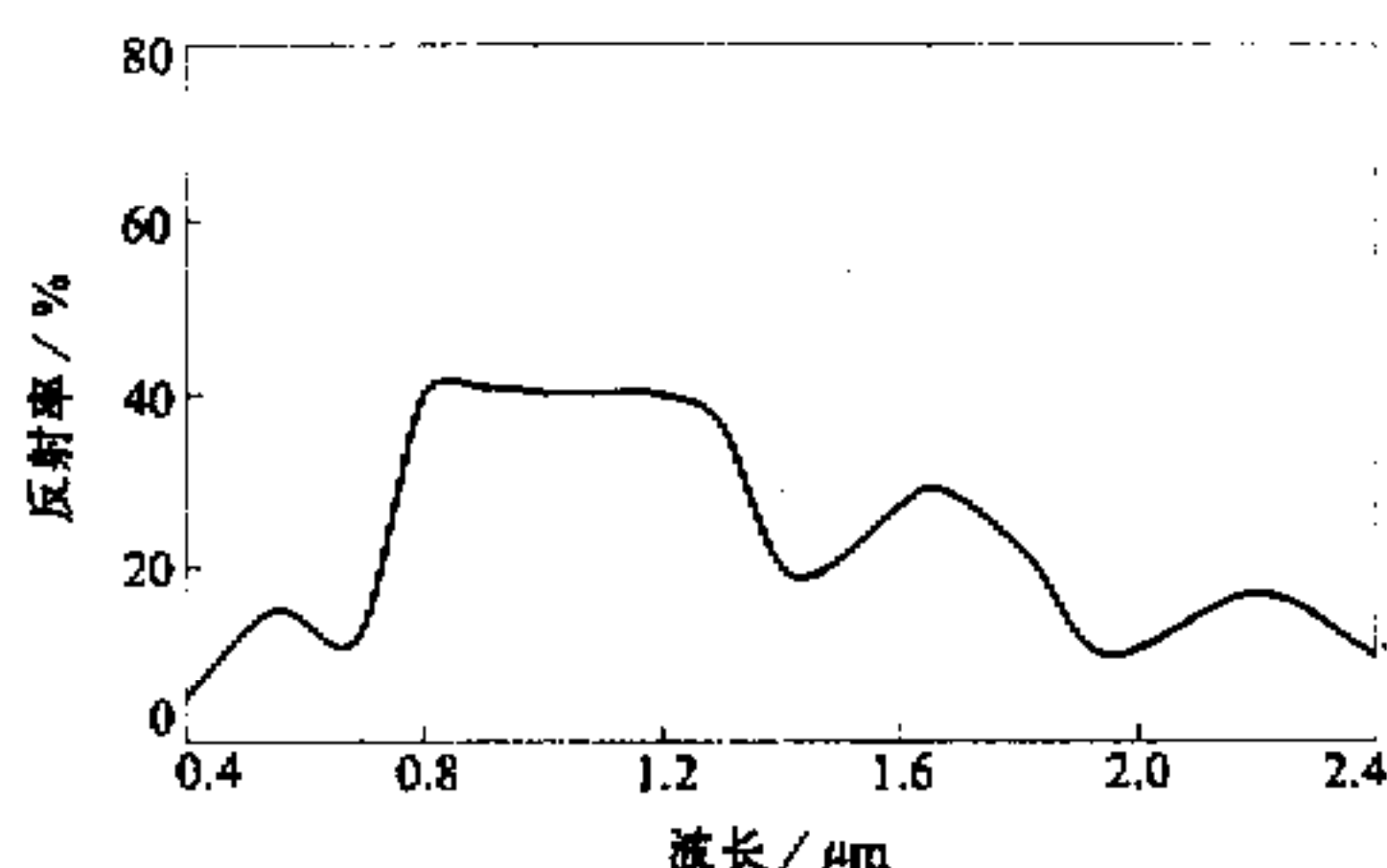


图 3 植物光谱响应曲线

表 4 是 4 月 23 日经过订正的结果, 通道 1 未经订正的反照率值在 8%~13%左右, 与 7 月 4 日未订正的通道 1 值比较略小些, 经过订正后的反照率值在 6%~12%左右。与 7 月 4 日、10 月 11 日两天订正后的通道 1 的反照率值比较, 4 月 23 日通道 1 订正后的值大。根据植物光谱曲线分析 (图 3), 4 月 23 日, 植被刚刚返青, 叶绿素含量不大, 因此通道 1 的值比较大。4 月 23 日, 通道 2 未订正反射值在 15%~25%, 与 7 月 4 日、10 月 11 日两天通

道 2 未订正的反射值比要小。经过订正后, 4 月 23 日通道 2 的地面反射值在 17%~29%。4 月 23 日通道 2 最大值区域是在 116°18'E, 40°18'N 左右, 北京地区土地利用图中, 这个区域是平地水田、旱地等, 有木本粮食作物。4 月份正是此区域小麦生长季节, 绿度值增加, 通道 2 的反射值大。

4 月 23 日订正后的 I_{ndv} 值比未订正的 I_{ndv} 值大 2~4 个单位。这天的地面能见度为 25 km, 气溶胶光学厚度为 0.2, 参看图 2, 气溶胶反射率(天底观测, 太阳天顶角为 60°)为 2%左右。这天地面相对湿度为 4%, 空气中水汽含量为 0.2 g/cm², 两个通道的水汽透射率函数近似为 1.00^[7], 臭氧含量与 10 月 11 日、7 月 4 日相同, 为 120 Du, 对于通道 1 略有影响(臭氧透射函数为 0.98)。分析 4 月 23 日的探测角约为 14°, 太阳天顶角为 41°左右。与 7 月 4 日比较, 路径方向不同, 探测路径短, 分子散射作用小。综合各种大气因素, 这天大气对于两个通道的影响作用明显小于 7 月 4 日与 10 月 11 日, 因此订正后的 I_{ndv} 值变化小, 仅比未订正时大 2~4 个单位左右。

上述对用辐射传输模式订正卫星探测资料的结果分析表明, 大气对于植被指数和卫星探测反射率值的影响是很大的, 而当浑浊度大, 水汽含量高, 分子散射作用强时, 进行大气订正更是十分必要的。但订正的效果好坏则与订正时考虑的大气状况与当时的实际大气状况是否一致有很大关系。

4.2 讨论

在用 LOWTRAN-7 订正可见光、近红外两个通道卫星反照率的过程中发现, 能见度、水汽的变化是进行大气订正实验计算中的敏感因子。

4.2.1 能见度(表征气溶胶)

选取一点, 选定大气模式, 改变其能见度, 用 LOWTRAN-7 模式计算, 结果如表 6。可看出在其他条件相同时, 能见度的改变, 对于订正的结果有较大影响, 说明了气溶胶这一因子对于卫星可见光、近红外两个通道监测有较大影响的。

表 6 能见度的变化对计算的敏感

能见度	I_{ndv}	B_1	B_2	LAT	LONG	SUNZEN
卫星探测值	4	0.087	0.145	40.300	116.200	42.000
5 km	13	0.036	0.185		AFTER DO L7	
10 km	12	0.046	0.183		AFTER DO L7	
25 km	9	0.070	0.177		AFTER DO L7	

4.2.2 水汽

同样选择北京站探空曲线, 以 7 月 4 日、4 月 23 日作比较, 能见度同为 25 km, 输入 LOWTRAN-7 模式计算, 结果如表 7。可以看出, 水汽含量的高低对于订正计算结果的影响尤其对于通道 2 影响较大。因此确定水汽、气溶胶含量, 对每个点作大气订正是十分重要的。

水汽、气溶胶非稳定影响因素针对植被稀疏茂密的不同地区, 对可见光、近红外波段造成影响是不尽相同的。选取 7 月 4 日, 植被稀疏、茂密的不同两点, 以北京站的常规探空资料作为订正的大气模式, 能见度 10 km, 结果如表 8。

可见对于植被茂密地区, 可见光和近红外波段的卫星探测受到大气状况影响更大, 因此, 对于利用卫星监测植被的分布及其生长, 进行大气订正是尤为重要的。

表 7 水汽含量的变化对计算的敏感

大气模式	I_{ndv}	B_1	B_2	LAT	LONG	SUNZEN
探测值	4	0.087	0.145	40.300	116.200	42.000
美国标准大气, 水汽含量 1.1 g/cm ² , 臭氧为 120 Du	9	0.070	0.177		AFTER DO L7	
4 月 23 日北京站, 水汽含量 0.2 g/cm ² , 臭氧为 120 Du	8	0.069	0.159		AFTER DO L7	

表 8 植被分布的不同对计算的敏感

植被分布	大气模式	I_{ndv}	B_1	B_2	LAT	LONG	SUNZEN
植被稀疏	探测值	3	0.126	0.188	39.90	116.320	41.642
	AFTER DO L7	11	0.06	0.223			
植被茂密	探测值	8	0.095	0.240	39.90	116.00	41.079
	AFTER DO L7	18	0.018	0.309			

通过以上的分析与讨论, 说明可见光、近红外卫星探测值进行大气订正是比较复杂的, 对于每个探测点, 不可能都确定其大气状况, 同时对探测资料要求较高, 需要精确的传感器定标和云的滤除。到达卫星的可见光和近红外辐射被大气 (主要是 O_3 和 H_2O) 部分吸收, 从而影响到两个光谱带观测反射率, 而分子和气溶胶的后向散射又产生一个额外的定向反射。此外, 当地面是朗伯表面或非规则时, 大气因素的影响就更为复杂。

5 结论

(1) 植被指数值及可见光、近红外通道卫星观测反演的反照率受大气参数的影响是十分显著的, 当能见度低、水汽含量大、分子散射作用强时, 进行大气影响订正更是十分必要的。

(2) 在利用理论传输模式订正计算中, 能见度、水汽等非稳定影响因素的变化是订正试验计算中的敏感因子。

(3) 大气参数如水汽、气溶胶等对于植被分布的不同地区造成的影响是不同的。

(4) 对气象卫星可见光、近红外通道探测反演的陆表物理量进行大气影响订正是比较复杂的。对于每个探测点, 最好都能确定其大气状况, 同时对其探测资料需要作精确的传感器定标和云的滤除。

致 谢 作者对赵高祥、王明星研究员的指导和胡非研究员的帮助表示深深的感谢!

参 考 文 献

- 1 Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer, 1991, *Remote Sens. Environ.*, **35**, 257~277.
- 2 国家卫星气象中心, 1992, 气象卫星在作物长势动态监测和产量估算中的应用, 气象卫星在资源与环境监测中的应用.
- 3 刘玉洁, AVHRR / HRPT 图象处理方法及其软件系统, 区域性极轨气象卫星资料定量处理及其软件系统(内部资料), 国家卫星气象中心.
- 4 N. Che and J. C. Price 1992, Survey of Radiometric Calibration Results and Methods for Visible and Near Infrared Channels of NOAA-7, -9, and -11 AVHRRS, *Remote Sens. Environ.*, **41**, 19~27.
- 5 李昕, 1996, 对 NOAA / AVHER 通道反照率和植被指数的大气影响订正试验, 中国科学院大气物理研究所硕士毕业论文.
- 6 吴北婴, 1994, 大气辐射传输基本算法与实用软件 LOWTRAN, 大气红外辐射传输模式应用研讨会文集.
- 7 Didier Tanre, Brent N. Holben and Yorann. J. Kanfman, 1992, Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application, *IEEE Transactzows on Geoscience and Remote Sensing*, **30**, No.2.

The Correction Experiment of Atmospheric Effects on NOAA / AVHRR Channel Albedos and Vegetation Indexes

Li Xin

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Meteorological satellites have been used widely in remote sensing of natural resources and environment. The vegetation index calculated by satellite radiative measurements is an important parameter reflecting land surface characteristics, and has already been used in vegetation monitoring, land surface classification and yield estimation and so on. In this paper, the calculation of vegetation index using AVHRR / NOAA-11 the near-IR and visible channel data in 1992 is described, and the necessity to consider the decay of sensitivity of radiometer on satellite in calibration is pointed out. On the other hand, the channel albedos and vegetation indexes have been investigated and a correction experiment of atmospheric effects has been carried out. The results indicate that the vegetation index could describe land surface characteristics well, but the atmosphere has significant impact on it, and it is necessary to make atmospheric correction.

Key words meteorological satellites AVHRR vegetation index atmospheric correction