

用 NOAA/ AVHRR 探测地表反射率和 NDVI 的 订正及误差分析*

王开存

(北京大学物理学院大气科学系,北京,100871)

陈长和

(兰州大学资源环境学院大气科学系,兰州,730000)

郭 锐

(中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州,730020)

摘 要

NOAA/ AVHRR 反射率和标准化差值植被指数(NDVI)资料在气象、水文等领域都有广泛的应用。但因为地表双向反射和大气对可见光和近红外辐射的影响,即使在地表没有变化的情况下,卫星探测到的反射率和 NDVI 也有很大的变化。在除云处理和 NOAA-14/ AVHRR 衰减校准的基础上,利用 6S 模式对 NOAA-14/ AVHRR 可见光和近红外反射率及 NDVI 资料进行了大气订正,并利用 Roujean 和 Rahman 模式在大气订正后进行了双向反射订正。大气订正使可见光反射率减小 3.34(反射率单位),近红外反射率增加 3.43(反射率单位),NDVI 增加了 0.22,分别占各自平均值的 78.2%,15.9%,35.5%。双向反射订正对 NDVI 的绝对值影响不大,但消除了反射率和 NDVI 的不规则变化,订正后能够较好地反映森林植被的物候效应。对各订正参数进行了误差分析,结果表明订正对太阳和卫星天顶角的误差最敏感。

关键词: 反射率 NDVI 大气订正 双向反射订正 误差分析

引 言

NOAA/ AVHRR 反射率和标准化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)资料在气象、水文等领域都有广泛的应用^[1-3],但由于 NOAA/ AVHRR 仪器特性以及地表、大气的作用使卫星探测到的地表反射率和植被指数在短时间内变化很大,从而无法获得长期可以相互对比的反射率和 NDVI 时间序列。NOAA/ AVHRR 的可见光和近红外通道的探测仪器在仪器使用过程中会产生衰减,因此出现了很多对 AVHRR 进行定标的方法。NOAA 卫星的轨道相变和轨道偏移产生的接收时间变化及季节变化使地表目标物的太阳天顶角、方位角有较大变化。另外,NOAA-14/ AVHRR 采用宽幅扫

* 国家自然科学基金 49675272 资助。

2001-12-30 收到,2002-07-15 收到修改稿。

描技术,使得卫星对地表目标物的天顶角和方位角也有很大的变化。太阳和卫星角度的变化会引起光学路径的变化,即使大气成分不变,光学路径的变化也会引起大气散射和吸收作用的变化。同时地表反射率随入射角和视角的变化而变化,即地表具有双向反射特性。因此,即使地表特性在缓慢变化过程中,因大气作用和地表双向反射作用的变化,NOAA-14/AVHRR探测到的反射率也会在短期内发生跳跃式的变化。显然,这种变化并不反映地表特性的实际变化,可以认为是遥感过程中产生的噪声。所以要得到长期可比较的地表特性信息,就必须对NOAA-14/AVHRR探测到的反射率进行大气效应和地表双向反射特性订正,以消除这种不规则的变化。

对NOAA/AVHRR可见光和近红外反射率的大气订正和双向反射订正开始于20世纪90年代初期^[4~6],但由于足够精度的水汽和气溶胶资料的缺乏,地表双向函数和大气订正模式还不够完善。对NOAA/AVHRR可见光和近红外反射率的大气订正和双向反射订正至今仍然是一个没有能够很好解决的问题。因此,本文首先利用实测的大气资料,采用新近发展的大气辐射传输模式^[7](6S)和成熟的双向反射分布函数^[8,9](Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF) (Roujean和Rahman模式)对森林植被上的NOAA-14/AVHRR可见光和近红外反射率及NDVI资料,在仪器衰减和除云处理的基础上,进行了大气和双向反射订正,把反射率和NDVI都订正到卫星和太阳都在天顶的情况下。并对各项订正对误差的敏感度进行了分析。

1 模式介绍

6S(Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)^[7]模式是法国大气光学实验室和美国马里兰大学地理系在5S(Simulation Satellite Signal in the Solar Spectrum)模式的基础上发展起来的。主要用来模拟星载或机载遥测仪器0.25~4.0 μm光谱上无云情况下地表反射的光信号。模式正算时,用来模拟遥测仪器测得的光信号;反算时,用来进行大气订正。

本文用作双向反射订正的模式有两个。Roujean和Rahman模式,前者变型后对于森林植被成了单参数模式,这一参数可用NDVI来表示。因此,不需任何假定就可进行双向反射订正。但Roujean是单参数模式,不能很好地模拟森林地表热点效应(当太阳和卫星在同一位置时,反射率有一极大值,此点称为热点)。

1.1 6S模式

模式的表达式为:

$$\rho_a^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = T_g \left\{ \rho_a + e^{-\tau/\mu_s} e^{-\tau/\mu_v} \rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + e^{-\tau/\mu_s} t_d(\mu_s) \bar{\rho} + e^{-\tau/\mu_s} t_d(\mu_v) \bar{\rho} + \frac{T(\mu_s) T(\mu_v) S \cdot \bar{\rho}^2}{1 - S \cdot \bar{\rho}} \right\} \quad (1)$$

ρ_a^* 为大气顶的反射率, θ_s (θ_v) 为太阳(卫星)天顶角, ϕ_s (ϕ_v) 为太阳(卫星)方位角, S 为球面反照率, T_g 为气体吸收透过率, ρ_a 为大气路径反射, ρ 为目标物反射率, $t_d(\mu_s)$ ($t_d(\mu_v)$) 为大气向上(下)散射透过率, $T(\mu_s)$ ($T(\mu_v)$) 为大气总向上(下)透过率。

$$\bar{\rho} = \frac{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \mu L_{R+A} \downarrow (T_A, T_R, \mu, \mu, \phi) \rho(\mu, \mu, \phi - \psi) d\mu d\phi}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \mu L_{R+A} \downarrow (T_A, T_R, \mu, \mu, \phi) d\mu d\phi} \quad (2)$$

$L_{R+A} \downarrow$ 是地面处向下的辐射亮度。 T_A 、 T_R 分别是气溶胶、大气分子的光学厚度。

$$\bar{\rho}^* = \bar{\rho} \quad (3)$$

$$\bar{\rho} \cong \frac{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \rho(\mu, \mu^*, \phi) \mu \mu^* d\mu d\mu^* d\phi}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu \mu^* d\mu d\mu^* d\phi} \quad (4)$$

进行大气订正时,假定地表为郎伯体,即令 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\rho}^*$ 、 $\bar{\rho}$ 与 ρ 相等,从方程(1)中解出 ρ 即可。

1.2 Roujean 模式

地表双向反射率 ρ 为:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi) = k_0 + k_1 f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) + k_2 f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (5)$$

k_0, k_1, k_2 是模式的 3 个参数, ϕ 为太阳和卫星方位角之差。

$$f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi \tan \theta_s \tan \theta_v -$$

$$\frac{1}{\pi} [\tan \theta_s + \tan \theta_v + \sqrt{\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos \phi}] \quad (6)$$

$$f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} [(\frac{\pi}{2} - \xi) \cos \xi + \sin \xi] - \frac{1}{3} \quad (7)$$

其中, ξ 为散射角, 它是太阳和目标物之间的光路与卫星和目标物之间的光路的夹角。

$\xi \in [0, \pi]$:

$$\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \phi \quad (8)$$

吴艾筌^[10]对 Roujean 模式进行了变形。令:

$$\Omega_i(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{\rho(\theta_s, \theta_v, \phi)}{\rho(0, 0, \phi)} = 1 + \alpha_{1i} f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) + \alpha_{2i} f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (9)$$

$i=1, 2$ 分别代表 AVHRR 可见光和近红外通道。式(9)利用了 $\rho(0, 0, \phi) = k_0$ 。吴艾筌^[10]对 α_{1i}, α_{2i} 进行了反演, 指出 α_{1i} 对于森林植被很小, 可认为 $\alpha_{1i} = 0$ 。森林上的 α_{21}, α_{22} 的函数表达式为:

$$\alpha_{21} = 3.347 I_{NDV}^{0.153} \quad (10)$$

$$\alpha_{22} = 1.830 I_{NDV}^{-0.105} \quad (11)$$

标准化差值植被指数 NDVI (I_{NDV}) 是按下式定义的:

$$I_{NDV} = \frac{\rho - \rho}{\rho + \rho} \quad (12)$$

1.3 Rahman 模式

Rahman 模式的表达式如下:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) = \rho \frac{\cos^{k-1} \theta_s \cos^{k-1} \theta_v}{(\cos \theta_s + \cos \theta_v)^{1-k}} F(g) [1 + R(G)] \quad (13)$$

$\rho \geq 0, k \in [0, 1]$ 是表达反射面特性的两个模式参数, $F(g)$ 为:

$$F(g) = \frac{1 - \theta^2}{[1 + \theta^2 - 2\theta \cos(\pi - g)]^{1.5}} \quad (14)$$

其中 θ 为模式参数, 它表示前向散射 ($0 \leq \theta \leq 1$) 和后向散射 ($-1 \leq \theta \leq 0$) 的相对大小。相角 (phase angle) $g \in [0, \pi]$ 为:

$$\cos g = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v) \quad (15)$$

$$1 + R(G) = 1 + \frac{1 - \rho}{1 + G} \quad (16)$$

$$G = \sqrt{\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)} \quad (17)$$

$1 + R(G)$ 表示热点 (hot spot) 的大小。为了更好地模拟植被上的热点效应, 可引入第 4 个模式参数 δ :

$$R(G) = \frac{1 - \rho}{\delta + G} \quad (18)$$

2 前期处理

在大气订正之前需进行除云处理和 NOAA-14/AVHRR 衰减校准。

除云的具体步骤为:

(1) 视图: 本文所选地表为森林, 可见光反射率很小, 与裸土反射率相差大, 在卫星图像上有较大的对比度。在可见光云图上, 要求森林种植面积轮廓清晰, 否则视为有云。

(2) 利用多波段的阈值进行检验^[9]:

$$(\rho + \rho_2)/2 < 35\% \quad (19)$$

$$\rho/\rho < 1.3 \quad (20)$$

$$T_4 < 280 \text{ K} \quad (21)$$

ρ 为地表目标物的可见光反射率 ($0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$), ρ_2 为地表目标物的近红外反射率 ($0.725 \sim 1.10 \mu\text{m}$), T_4 为 NOAA-14/AVHRR 第 4 通道亮温。

本文的衰减订正系数采用 Rao 和 Chen^[11] 1996 年得出的绝对校准系数。

3 地点订正

订正点在兴隆山落叶林区 ($35.88^\circ \text{N}, 103.98^\circ \text{E}$), 位于中国西北部, 为温带半干旱气候。订正地点下垫面为落叶阔叶林。卫星资料的时间范围是 2000 年 7 月 8 日至 9 月 14 日和 1999 年 8 月 28 日至 9 月 24 日 (见表 1)。此时恰逢本地区的雨季, 7~9 月降雨量占全年降雨量的 57.5%。订正点上空常有积雨云、积云、地形云, 晴空资料特别少。两年中森林生长茂盛期 (7~9 月) 仅有 9 份资料, 但是这 9 份资料的卫星天顶角和太阳天顶角的

范围都很大,分别为 $1^{\circ} \sim 44^{\circ}$ 和 $36.4^{\circ} \sim 61.5^{\circ}$ 。因此,这些资料较好地代表了订正点的卫星资料。

表 1 订正参数

订正时间	太阳天顶角(度)	太阳方位角(度)	卫星天顶角(度)	卫星方位角(度)	水汽总量(g/m^2)	能见度(km)	臭氧总量(10^3DU)
1999-08-28	52.3	252.5	36	275	1.44	30	0.285
1999-09-06	54.6	249.6	34	276	1.65	30	0.285
1999-09-07	52.9	247.2	17	298	3.21	30	0.285
1999-09-24	60.1	244.5	27	283	1.26	20	0.285
2000-07-08	46.7	267.9	10	123	0.91	30	0.32
2000-07-14	53.1	271.4	37	275	2.32	30	0.315
2000-07-16	48.4	267.5	1	145	2.13	30	0.315
2000-07-24	50.7	267.0	12	120	2.84	30	0.31
2000-09-14	61.5	251.7	8	126	1.34	30	0.285

反射率取自 NOAA-14/ AVHRR,取 2×2 个像素平均,然后求得 NDVI。臭氧总量从气候图中读出^[12],水汽总量从高空探空资料按高度积分求得,能见度由地面常规观测获得。因为缺乏气溶胶垂直浓度和光学厚度的测量,本文采用 6S 模式中的算法,由水平气象能见度给出气溶胶光学厚度,气溶胶类型采用大陆型夏季乡村气溶胶。值得注意的是,本文各订正时次的气溶胶的含量均很小,能见度为不小于 30 km 的量级,文中取能见度为 30 km。

4 结果订正

4.1 大气订正

大气订正后(图 1), ρ 明显变小, ρ 随时间的变化趋势减缓,说明大气的作用使 ρ 变大,大气订正消除了 ρ 的部分噪音;大气订正后, ρ_2 增加, ρ_2 随时间的变化趋势稍有增

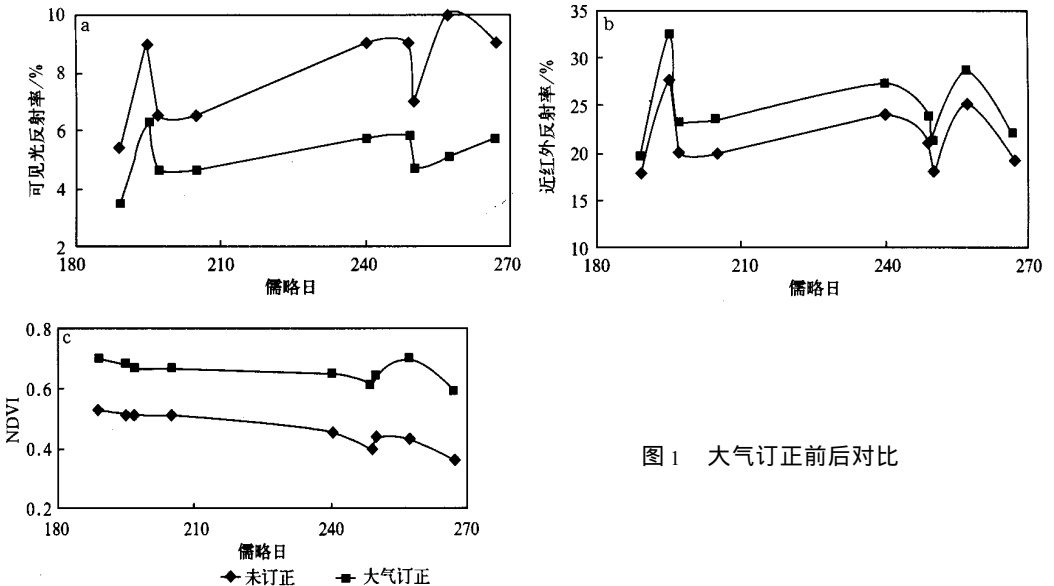


图 1 大气订正前后对比

大。大气订正使 NDVI 显著增加。可以看出, 大气订正后, 反射率及 NDVI 随时间的不规则变化依然很大, 还需要在大气订正后进行双向反射订正。

假定大气各成分对光信号的作用之间无相互作用, 可求出大气各成分的订正差值。订正差值在这里被定义为订正后的值减订正前的值, 然后对各订正时次进行平均。表 2 表示了大气各成分的平均订正差值。把各成分的订正差值除以地表真实值(大气订正后进行双向反射订正后的平均值), 可得各成分的相对影响(表 2 括号内的值, 单位为 %), 相对影响取绝对值。对可见光反射率, 大气分子订正差值最大, 然后是气溶胶订正、臭氧订正和水汽订正。对近红外反射率, 水汽订正差值最大, 其次是气溶胶订正。大气分子订正和气溶胶订正对 NDVI 的影响最大。大气效应对可见光反射率影响很大, 大气订正差值占地表真实值的 78.2%, 大气效应对近红外反射率的影响较小。大气效应对 NDVI 的影响也很大。

表 2 大气各成分的平均订正差值

	大气分子订正	臭氧订正	气溶胶订正	水汽订正	大气订正
可见光反射率	- 2.49 (56.1)	0.64 (15)	- 1.49 (34.1)	0.09 (2.2)	- 3.34 (78.2)
近红外反射率	- 0.06 (0.34)	0.08 (0.46)	0.76 (3.6)	2.79 (12.9)	3.43 (15.9)
标准化差值 植被指数	0.124 (20)	- 0.035 (5.6)	0.102 (16.5)	0.034 (5.5)	0.22 (35.5)

注: 括号内为相对影响

Kaufman^[13]在估计草地产量时指出, NDVI 的 0.05 的误差可以产生 30% 的产量估计误差。由表 2 可知, 大气订正使 NDVI 增加 0.22, 如果不进行大气订正, 利用 NDVI 进行作物估产几乎是不可信的。因此要准确应用卫星资料, 就必需进行大气订正。

4.2 双向反射订正

利用 Roujean 单参数模式对大气订正后的反射率进行双向反射订正, 结果见图 2。订

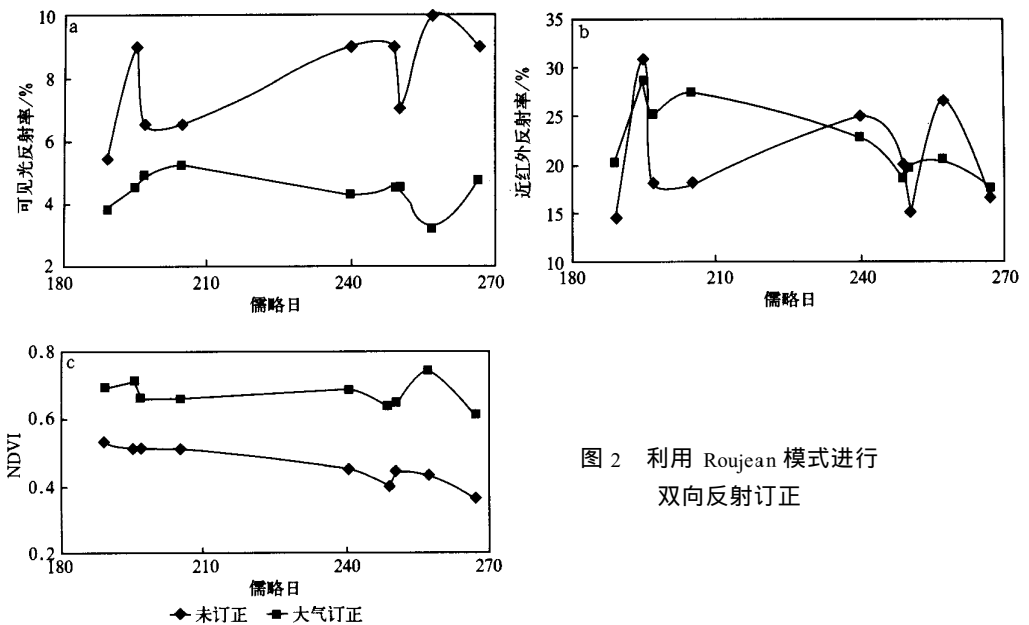


图 2 利用 Roujean 模式进行双向反射订正

正后 ρ 、 ρ 的变化范围变小, 随时间的变化趋势减缓, NDVI 较大气顶的值有较大的增加。但我们可以看出式(5)进行双向反射订正会产生如下不合理的现象:(1) ρ 7 月份的值大于 9 月份,(2) 7 月 14 日和 9 月 14 日因为 ρ 的大值 NDVI 出现了不合理的高值。这是因为, 7 月卫星处于后向散射区, 9 月处于前向散射区, 而后向散射大于前向散射; 7 月 14 日, 9 月 14 日在热点附近。Roujean 模式并不能很好地模拟热点效应, 模式模拟的前、后向散射区分不明显^[8]。所以 7 月 14 日, 9 月 14 日经双向反射(BRDF)订正后 ρ 依然过高。7 月份 ρ 偏高也是由此引起的。

在对植被上的反射率进行模拟和订正时, Rahman 模式被认为是最准确的双向反射模式^[14], Rahman 模式可以很好地模拟热点效应。但 Rahman 模式是一个 3 参数或 4 参数的非线性模式。它的参数多, 本次订正的资料较少, 如果直接进行拟合, 会因为数据点太少而带来偶然性误差。如前面所述 Roujean 模式可以基本正确的进行双向反射订正。就此假定 Roujean 模式订正后的平均值是基本正确的, 取其订正后的 ρ 、 ρ 的平均值作为拟合 Rahman 模式参数的依据。

下面是拟合 ρ , K , θ , δ 的步骤及注意事项:

- (1) 在 B. Duchemin^[15] 给出的温带森林的 3 参数的基础上调整各参数使反演偏差最小。
- (2) 利用第一步得出的模式对大气订正后的反射率进行双向反射订正, 订正后的平均值应和 Roujean 模式订正后的平均值一致。

拟合偏差 σ 由下式给出:

$$\sigma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\rho_{opi,j} - \rho_{modeli,j})^2 \tag{22}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_i} \tag{23}$$

其中 $i = 1, 2$ 表示通道 1, 通道 2, $n = 9$ 为总有效订正次数。 $\rho_{opi,j}$ 为实际值, $\rho_{modeli,j}$ 为模拟值。

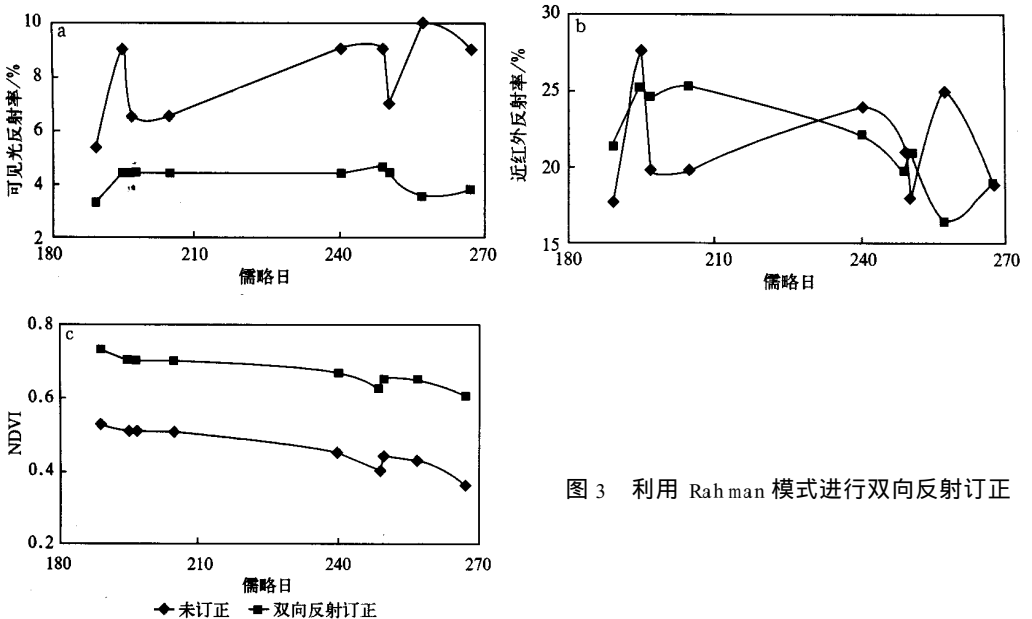


图 3 利用 Rahman 模式进行双向反射订正

把表 3 给出的模式参数代入式 (13), 然后对大气订正后的 ρ 、 ρ 进行双向反射订正, 图 3 给出了订正结果。

Rahman 模式订正后, 消除了反射率由

于热点效应引起的不合理的高值, 消除了反射率和 NDVI 的不规则变化。订正后 ρ 进入 9 月份后缓慢变大, ρ 变小, NDVI 值变小, 这符合植物的物候现象。这与 B. Duchemin^[15,16]用 NOAA/ AVHRR 对温带落叶林的枯落叶期观察得出结果相似。

5 订正误差对各参量误差的敏感度

选用 2000 年 7 月 14 日和 7 月 16 日作为误差分析的个例(表 1), 7 月 14 日卫星最接近太阳主平面, 卫星天顶角大, 卫星在后向反射区热点附近, 反射率大, 7 月 16 日卫星最接近太阳垂直平面, 卫星天顶角小, 卫星在前向反射区, 反射率小。因为两次的的时间相距很近(中间只差一天), 可以推断出可见光和近红外反射率的巨大变化应是由植被以外的因素引起的。两日的臭氧和气溶胶浓度无变化, 水汽的变化也很小, 发生较大变化的量是卫星方位角、天顶角和太阳方位角、天顶角。

定义敏感度因子 M :

$$M = \left| \frac{\Delta \rho \cos \theta_s \cos \theta_v}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \right| \tag{24}$$

其中 $\Delta \rho$ 为订正误差, Δx_i 为各参量的误差。 x_i 为各参量的代表值。天顶角和方位角的代表值均取为 90° , 其他各参量代表值是参量本身的值。假定各参量有 $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$ 的误差, 代入 6S 模式进行大气订正, 所得订正结果与参量没有误差时订正结果的差为订正误差, 利用式(24) 计算订正误差对各参量误差的敏感度, 对各种可能误差求平均, 计算结果见表 4, 5, 表中没有标明日期的为两天的平均。

表 4 大气订正误差的敏感度 %

通道	地面高度	臭氧	水汽	气溶胶	卫星天顶角		卫星方位角	
					7 月 14 日	7 月 16 日	7 月 14 日	7 月 16 日
					Ch1	0.35	0.29	0.0
Ch2	1.10	0.0	1.08	0.68	0.9	0.0	0.11	0.0

注: 未标日期者为两天平均值。

表 5 双向反射订正误差的敏感度 %

模式 日期 通道	Roujean				Rahman			
	7 月 14 日		7 月 16 日		7 月 14 日		7 月 16 日	
	Ch1	Ch2	Ch1	Ch2	Ch1	Ch2	Ch1	Ch2
卫星天顶角	2.2	9.1	1.4	2.2	2.9	17.1	0.0	1.4
卫星方位角	0.28	0.93	0.0	0.23	0.35	1.4	0.0	0.0

太阳天顶角和太阳方位角具有卫星天顶角和卫星方位角相似的敏感度, 但太阳天顶

角和太阳方位角可以精确算出,所以文中没有给出它们的敏感度。

7月14日大气订正误差对天顶角和方位角的敏感度要大于7月16日,这是因为7月14日卫星在后向散射区热点附近,天空亮度(散射辐射)在此区域强,且对角度的敏感度大于其它区域^[17]。从表4中可以看出,对可见光反射率,敏感度按大到小排列为:(1)卫星天顶角,(2)气溶胶,(3)卫星方位角,(4)地面高度,(5)臭氧,(6)水汽。对近红外反射率,敏感度按从大到小排列为:(1)地面高度,(2)水汽,(3)卫星天顶角,(4)气溶胶,(5)卫星方位角,(6)臭氧。近红外反射率的大气订正误差对地面高度误差十分敏感,这是因为地面高度的变化引起了气压的变化,从而引起水汽吸收的变化。

双向反射订正误差对卫星天顶角很敏感。当天顶角大时,双向反射的订正误差对天顶角的敏感度很大。但订正误差对卫星方位角并不十分敏感。从双向反射订正公式(5)中知道,森林上的双向反射函数(Roujean模式)只与体散射函数 f_2 有关,而体散射函数与卫星方位角几乎无关,所以双向反射的订正误差对卫星方位角的敏感度较小。从表5还可看出,7月14日双向反射订正误差对天顶角和方位角误差的敏感度均大于7月16日。这是因为,7月14日卫星在后向散射区热点附近,BRDF在热点附近反射率突然变大,此区域内反射率对角度的敏感度大。所以,此区域订正误差对天顶角和方位角误差的敏感度要大于其它区域。

结合大气订正的敏感度分析,我们可以给敏感度排一个顺序。对 ρ ,按从大到小的顺序为:(1)卫星天顶角,(2)气溶胶,(3)地面高度,(4)卫星方位角,(5)臭氧,(6)水汽;对 ρ_2 为:(1)卫星天顶角,(2)地面高度,(3)水汽,(4)气溶胶,(5)卫星方位角,(6)臭氧。

6 结 论

(1) 大气订正使可见光反射率减小,近红外反射率增加,NDVI增加。但对它们随时间的不规则变化影响不大,需再进行双向反射订正。双向反射订正基本消除了反射率和NDVI的不规则变化,可以较好地反映植被的物候效应。

(2) 大气订正使可见光反射率减小3.34(反射率单位),近红外反射率增加3.43(反射率单位),NDVI增加了0.22。分别占各自平均值的78.2%,15.9%,35.5%。

(3) 双向反射订正基本上消除了反射率和NDVI的不规则变化,订正后反射率和植被NDVI可以反映地表植被的物候效应。

(4) 订正误差对天顶角和方位角误差的敏感度。因后向散射区热点附近天空亮度随角度变化大,此时的大气订正误差对天顶角和方位角的敏感度要大于其它区域。在后向散射区热点附近,因反射率随角度的变化大,订正误差对角度敏感度大于其它区域。

参 考 文 献

- 1 刘健,许健民,方宗义.利用NOAA卫星的AVHRR资料试分析云和雾顶部的粒子尺度特征.应用气象学报,1999,10(1):28~33.
- 2 石宇虹,朴瀛,张箐.应用NOAA/AVHRR资料监测水稻长势的研究.应用气象学报,1999,10(2):243~248.
- 3 陈怀亮,冯定原,邹春辉.用遥感资料估算深层土壤水分的方法和模型.应用气象学报,1999,10(2):232~237.

- 4 秦益,田国良. NOAA AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制:第一部分:原理和模型. 环境遥感, 1994, 9(1):11~21.
- 5 秦益,田国良. NOAA AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制:第二部分:软件研制. 环境遥感, 1994, 9(2):81~91.
- 6 吴艾笙. 黑河实验区 AVHRR 反射资料的各向异性订正. 高原气象, 1990, 9(2):136~143.
- 7 Vermote E F, Tanre D, Herman M, et al. Second simulation of satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transaction Geosciences and Remote Sensing*, 1997, 35(35): 675~686.
- 8 Roujean J L, Leroy M, Deschamps P, et al. A bi-directional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 20455~20468.
- 9 Rahman H, Pinty B, Verstraete M M, et al. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2: semi empirical surface model usable with NOAA advanced very high-resolution radiometer data. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(D11): 20791~20801.
- 10 Wu Aisheng, Li Zhanqing, Cihler J, et al. Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometer bi-directional reflectance: analysis and removal. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(D5): 9179~9192.
- 11 Rao N C R, Chen J. Post-launch calibration of visible and near-infrared radiometer on the NOAA-14 spacecraft. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, 17: 2743~2747.
- 12 周秀骥,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学. 北京:气象出版社, 1991. 11.
- 13 Kaufman Y J, Holben B N. Calibration of the AVHRR visible and near-infrared band by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. *J. Applied Meteor.*, 1990, 29: 170~202.
- 14 Privette J L. Estimating spectral albedo and nadir reflectance through inversion of simple BRDF models with AVHRR/Modis-like data. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D24): 29529~29542.
- 15 Duchemin B. NOAA/ AVHRR bi-directional reflectance: modeling and application for monitoring of a temperate forest. *Remote Sense. Environ*, 1999, 67: 51~67.
- 16 Dutchmen B. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/ AVHRR data. *Remote Sens. Environ.*, 1999, 67: 68~8.
- 17 王永生主编. 大气物理学. 北京:气象出版社, 1987. 370~379.

CORRECTIONS TO NOAA/ AVHRR REFLECTANCE AND NDVI AND THEIR ERROR ANALYSIS

Wang Kaicun

(Atmospheric Department, Physics College, Peking University, Beijing 100871)

Chen Changhe

(Atmospheric Department, Resource and Environment College, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Guo Ni

(Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, 730020)

Abstract

NOAA/ AVHRR reflectance and normalized difference vegetation index (NDVI) data have been widely used in meteorological and hydrological fields. Because the bi-directional reflectance distribution of surface and the scatter and absorption effects of atmosphere, even though the surface keeps unchanged, the reflectance obtained by satellites can vary greatly.

After cloud removing and degradation-correcting processing, atmospheric corrections are carried out to NOAA/ AVHRR visible and near-infrared reflectance and NDVI data using the 6S model, and then bi-directional reflectance corrections are carried out. The atmospheric correction makes the visible reflectance decrease by 3.34 (reflectance unit), the near infrared reflectance increase by 3.43 (reflectance unit), and increases the NDVI increase by 0.22, equaling to 78.2 percent, 15.9 percent and 35.5 percent of their own respectively. The bi-directional reflectance correction does not affect the amount of NDVI distinctively, but can remove the irregular variances of the reflectance and NDVI. After corrections, the reflectance and NDVI can reflect the phenological effect of deciduous forests (the land cover of the surface target). At last, based on the error analysis, the sensitivities of correction errors to the errors of correction parameters are given, and the results show that the solar and satellite zenith angles are the most sensitive parameters.

Key words: Reflectance NDVI Atmospheric correction Bi-directional reflectance correction Error analysis