

# 大气对 AVHRR 通道反射太阳辐射各向异性的影响\*

汪宏七 赵高祥

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

## 提 要

在不同太阳天顶角及不同地表条件下,通过辐射传输计算,考察了大气对 NOAA/AVHRR 可见和近红外通道辐射强度各向异性转换系数的影响.结果表明,在地表为朗伯面的情况下,大气气溶胶有增强辐射强度的各向异性和改变辐射强度角分布型式的作用.

**关键词:**辐射强度;各向异性;气溶胶.

## 引 言

由卫星上 AVHRR 可见和近红外通道对反射太阳辐射的测量,可得到诸如地面反照率,行星反照率和植被指数等重要的气候和环境参数.在测量反射太阳辐射强度的同时,还包含有关地表和大气状态的信息.大气通过对辐射的吸收、散射,以及本身对太阳辐射的反射,影响到辐射强度的大小及其角度分布的不均匀性.当测量某一方向上的辐射强度,并得出与向上半球所有方向上辐射强度的积分量有关的反照率时,必须考虑对这种大气影响进行订正<sup>[1,2]</sup>.通过对不同方向上 AVHRR 通道 1 和 2 的辐射测量,得出的植被指数的分析比较中,也应考虑大气对辐射强度角分布的各向异性的影响.

由于大气状况不同,对反射太阳辐射的强度大小和角度分布的影响也不同.本文通过辐射传输计算,考察了晴空条件下,不同太阳天顶角,不同地表,大气中的不同气溶胶对 NOAA/AVHRR 的可见和近红外通道辐射强度的各向异性转换系数的影响.

## 1 计算方法

大气顶向上反射太阳辐射强度的角分布的差异可用各向异性转换系数  $g(\theta_0, \theta, \varphi)$  来表征,它的定义为

\* 国家基础性研究重大关键项目资助.

1994-10-14 收到,1995-04-05 收到修改稿.

$$g(\theta_0, \theta, \varphi) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta_0, \theta', \varphi) \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi}{\pi \bar{I}(\theta_0, \theta, \varphi)} \quad (1)$$

式中,  $I(\theta_0, \theta, \varphi)$  为太阳天顶角为  $\theta_0$  时, 射出辐射天顶角为  $\theta$ 、相对于太阳的方位角为  $\varphi$  方向上的反射太阳辐射强度. 式(1)可改写为

$$g(\theta_0, \theta, \varphi) = \frac{\bar{I}}{I(\theta_0, \theta, \varphi)} \quad (2)$$

式中  $\bar{I}$  为在各向同性假定下的反射辐射强度.  $g = 1$  表示该方向的反射辐射强度与假定大气顶的反射辐射场为各向同性时的辐射强度相等,  $g < 1$  表示实际的辐射强度大于各向同性时的辐射强度,  $g > 1$  则相反.

当通道的宽度为  $\Delta\lambda$  时, 辐射强度  $I$

为

$$I(\theta_0, \theta, \varphi) = \int_{\Delta\lambda} I_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi) f(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中  $I_\lambda$  为波长  $\lambda$  处的单色辐射强度,  $f(\lambda)$  为通道的响应函数.

NOAA/AVHRR 的可见通道(CH. 1)和近红外通道(CH. 2)的光谱范围分别为  $0.54 \sim 0.78\mu\text{m}$  和  $0.68 \sim 1.10\mu\text{m}$ , 利用考虑了多次散射的精确的辐射传输计算方法<sup>[3,4]</sup>, 计算了在不同地表, 不同太阳天顶角和不同大气气溶胶的情况下, 这两个通道在大气顶的反射太阳辐射强度的各向异性转换系数  $g$ . 计算中考虑了大气对水汽、臭氧和氧气等气体的吸收, 分子散射和气溶胶的吸收及散射作用. 大气被看作是平面平行的. 大气气溶胶状况分为无气溶胶, 以及平流层为背景气溶胶, 对流层分别为乡村大陆气溶胶、城市气溶胶和大陆沙暴气溶胶<sup>[5]</sup>等几种. 地表则假定为均匀的朗伯面. 太阳和卫星的位置, 卫星视角  $\theta$  及相对太阳主平面的方位角  $\varphi$  的示意图由图 1 表示.

## 2 计算结果和讨论

首先考察纯分子大气对反射太阳辐射角分布的影响. 图 2 给出了在地表反照率为 0 时, 无气溶胶的中纬度夏季模式大气, 在不同太阳天顶角时, 大气顶的 AVHRR 可见和近

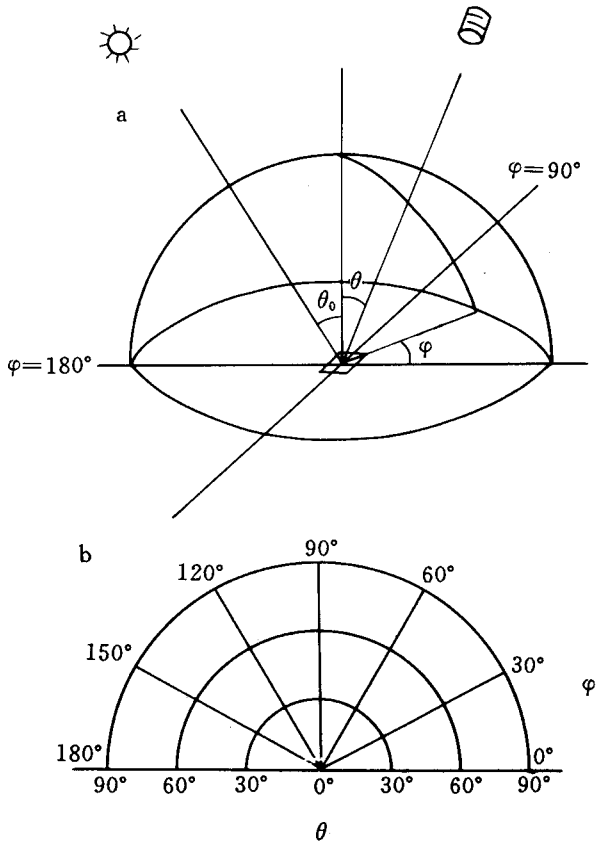


图 1 卫星视角示意图

Fig. 1 Schematic of satellite viewing angles

红外通道的反射太阳辐射强度各向异性转换系数  $g(\theta, \varphi)$  的等值线. 由图可见, 由气体吸收和分子散射造成的反射辐射的各向异性是随太阳天顶角  $\theta_0$  的增大而增强的. 就散射辐射角度分布的型式而言, 单个粒子瑞利散射辐射强度在前后向是对称的, 并且在散射角为  $0^\circ$  (前向) 和  $180^\circ$  (后向) 时有极大值, 在散射角为  $90^\circ$  方向为极小. 在实际大气中, 由于大量粒子 (分子) 存在造成的多次散射, 使散射辐射的角分布与单个粒子时不同, 太阳天顶角  $\theta_0$  越大, 太阳辐射经过的路径越长, 多次散射作用也强. 在  $\theta_0$  接近  $90^\circ$  时, 与入射太阳辐射约为  $90^\circ$  的  $\theta=0^\circ$  附近, 反射辐射有极小值 ( $g$  极大), 而在偏离天顶的方向上 ( $\theta > 0^\circ$ ),  $\theta$  相同时, 则在  $\varphi=90^\circ$  附近有极小值; 当  $\theta_0$  减小时, 反射辐射的各向异性也随之变化, 反射辐射的极小值出现在  $\varphi=0^\circ$  的方向上, 但射出辐射天顶角  $\theta$  的方位已偏离与入射太阳辐射成  $90^\circ$  的方向.

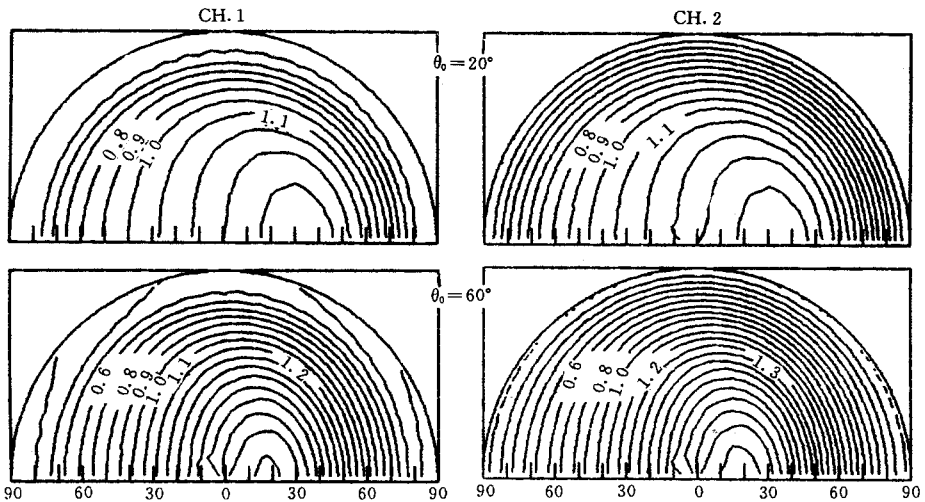


图 2 大气顶 AVHRR 可见和近红外通道射出辐射强度各向异性转换系数  $g(\theta, \varphi)$  等值图 (地表反照率为 0, 无气溶胶大气)

Fig. 2 Isopleth of anisotropic conversion coefficient  $g(\theta, \varphi)$  of outgoing radiances at the top of the atmosphere in AVHRR visible and near infrared channels (surface albedo is zero, pure molecular atmosphere)

当地表反照率不等于 0 时, 大气顶反射的太阳辐射中, 除了直接由大气散射的辐射外, 还包括到达地面后经地面反射再经大气消光后到达大气顶的辐射. 当地表反射为各向同性, 大气水平均匀时, 这后一部分辐射的大小与  $\varphi$  无关, 而与  $\theta$  有关, 在  $\theta$  较大的方向上, 光程长, 消光大, 因而射出辐射较小 ( $g$  大), 这正好与纯粹由大气散射吸收引起的反射太阳辐射的角分布各向异性相反. 大气顶的反射太阳辐射的角度分布特性, 就由这两部分具有相反的角分布性质的辐射迭加确定. 地表反照率越大, 则与地表反射有关的这部分辐射对大气顶反射辐射各向异性的影响越大; 大气越混浊 (光学厚度越大), 则地表的影响减小, 大气本身的作用增强. 图 3 是地表为黑土 (对通道 1 和 2, 其光谱平均地表反照率为  $\alpha_1 = 0.0480$  和  $\alpha_2 = 0.0475$ ),  $\theta_0 = 20^\circ$  时, 中纬度夏季模式大气中, 在无气溶胶和有乡村大陆气溶胶的两种情况下, 通道 1 和 2 的各向异性转换系数  $g$  的分布. 对于无气溶胶的情况,

与图 2 中  $\theta_0=20^\circ$  的结果相比可见,地表反照率增加使反射辐射的各向异性程度变弱,且分布型式也不同. 对其它太阳天顶角  $\theta_0$  和大气中有不同气溶胶时,也有类似结果.

与分子散射具有对称性不同,气溶胶粒子有强的前向散射,而后向散射则较弱,因此,当大气中有气溶胶时,不同浓度和光学性质的气溶胶对辐射的吸收和散射作用不同,直接影响到反射辐射的各向异性. 图 3 的结果表明,在同样的地表、同样的太阳天顶角条件下,

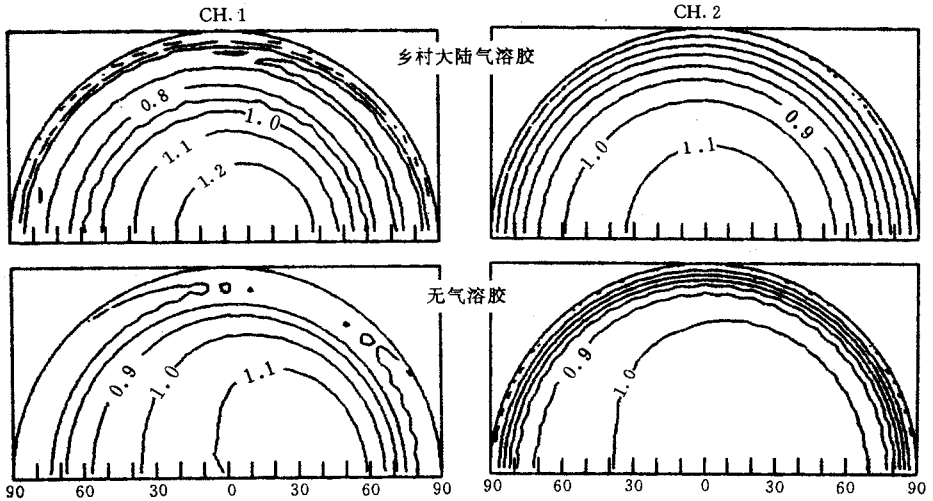


图 3 大气顶 AVHRR 可见和近红外通道射出辐射强度各向异性转换系数  $g(\theta, \varphi)$  等值图 (黑土地表, 中纬度夏季大气, 太阳天顶角  $20^\circ$ )

Fig. 3 As in Fig. 2, but for black soil, midlatitude summer atmosphere, solar zenith angle  $\theta_0=20^\circ$

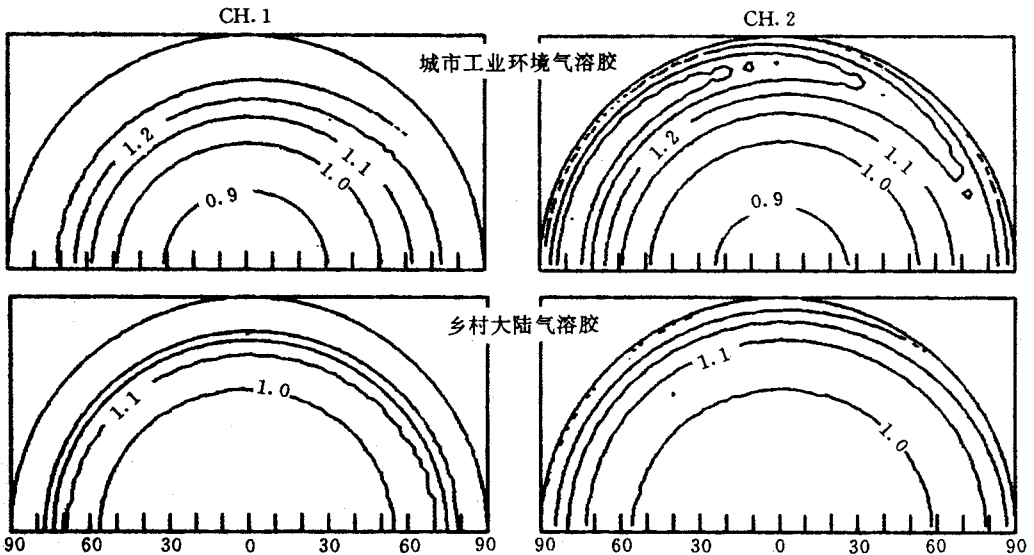


图 4 大气顶 AVHRR 可见和近红外通道射出辐射强度各向异性转换系数等值图 (雪地地表, 中纬度冬季大气, 太阳天顶角  $20^\circ$ )

Fig. 4 As in Fig. 2, but for snow surface, midlatitude winter atmosphere, solar zenith angle  $\theta_0=20^\circ$

气溶胶有增强反射太阳辐射各向异性的作用. 图 4 是在高地表反照率的雪地上( $\alpha_1 = 0.871, \alpha_2 = 0.850$ ), 中纬度冬季大气中气溶胶不同时, 通道 1 和 2 的各向异性转换系数的角度分布. 比较图 3 和图 4 可见, 它们的各向异性转换系数  $g$  的分布具有相反的趋势, 在低地表反照率的黑土时, 在星下点附近  $g$  为大于 1 的值, 随  $\theta$  增加,  $g$  值减小; 而雪地的情况正好相反,  $g$  值在天顶角  $\theta$  小时有小于 1 的值, 在  $\theta$  角较大时出现大于 1 的值, 在这两种情况下, 气溶胶都具有增大  $g$  值的变化范围、使反射辐射各向异性增强的作用.

当地表为作物时, 通道 1 的地表反照率低( $\alpha_1 = 0.085$ ), 通道 2 的地表反照率较高( $\alpha_2 = 0.35$ ), 两者有较大差别. 图 5 是在作物地表, 太阳天顶角  $\theta_0 = 20^\circ$ , 中纬度夏季大气中 3 种不同气溶胶的情况下, 通道 1 和 2 的反射太阳辐射强度的各向异性转换系数  $g$  的分布. 图 5 表明, 这时 2 条通道的反射辐射强度分布有相反的趋势, 通道 1 在  $\theta$  小时,  $g$  大于 1, 在  $\theta$  大时,  $g$  小于 1; 通道 2 则相反, 在  $\theta$  小时,  $g$  小于 1, 在  $\theta$  大时,  $g$  大于 1. 这与地表为黑土或雪地时, 2 条通道的反射辐射强度分布有相同的趋势是不同的. 在这类情况下, 如不考虑各向异性订正, 即使是同类地表, 由这 2 条通道的辐射测量导出的参数(如植被指数), 在  $\theta$  和  $\varphi$  不同时可有显著的差别, 从而使参数带有更大的不确定性.

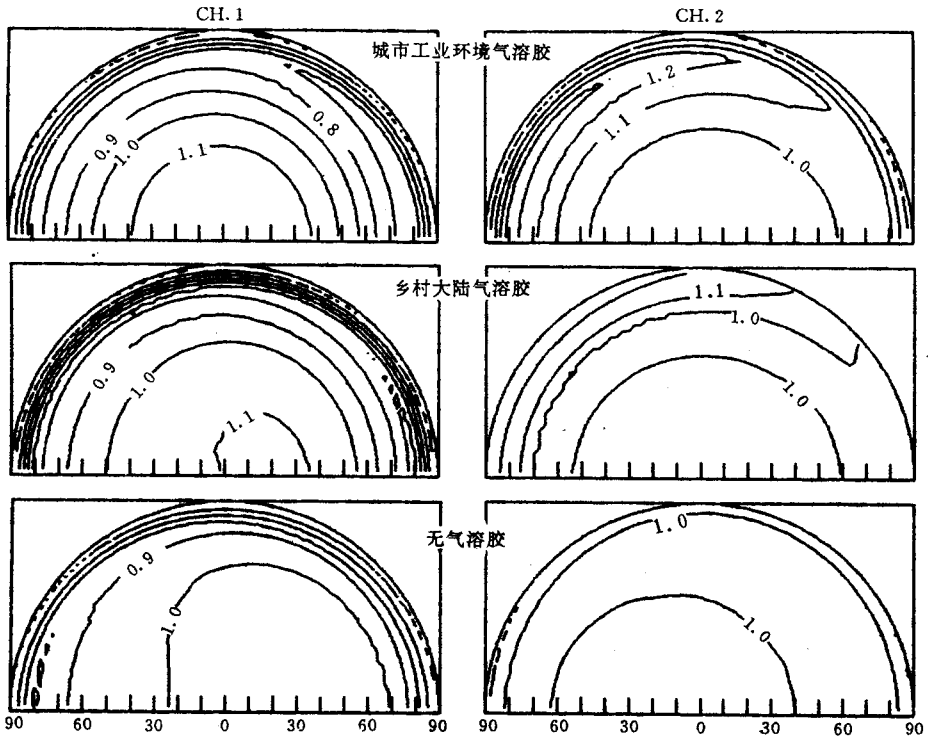


图 5 大气顶 AVHRR 可见和近红外通道射出辐射强度各向异性转换系数等值图 (作物地表, 中纬度夏季大气, 太阳天顶角  $20^\circ$ )

Fig. 5 As in Fig. 2, but for plant surface, midlatitude summer atmosphere, solar zenith angle  $\theta_0 = 20^\circ$

除了对太阳天顶角  $\theta_0 = 20^\circ$  时, 不同地表的  $g$  进行计算外, 还对  $\theta_0 = 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$  时, 不同地表的  $g$  进行了计算. 虽然这时在不同大气状况下得到的 AVHRR 通道 1 和 2 的各向

异性转换系数  $g$  的分布型式有不小的差别,但在太阳天顶角不很大的多数情况下,各向异性转换系数  $g$  为 1 的值出现在卫星视角  $\theta$  约  $50^\circ$  和  $\varphi$  约  $90^\circ$  的方向上. 因此,表示  $(\theta, \varphi)$  方向上各向异性转换系数  $g$  的式(2)可近似写为

$$g(\theta_0, \theta, \varphi) = I(\theta_0, 50^\circ, 90^\circ) / I(\theta_0, \theta, \varphi) \quad (4)$$

即  $(\theta, \varphi)$  方向上的  $g$  值可由  $(\theta=50^\circ, \varphi=90^\circ)$  方向上和  $(\theta, \varphi)$  方向上的辐射强度测值近似确定. 这样,在太阳天顶角  $\theta_0$  不是很大时,可直接由  $(\theta=50^\circ, \varphi=90^\circ)$  附近方向上的测量值得到通道 1 和 2 的窄带行星反照率,进而得到整个太阳光谱区的行星反照率.

### 3 结 语

大气顶 AVHRR 可见和近红外通道反射太阳辐射强度的各向异性转换系数  $g$  在不同太阳天顶角和不同地表时可有很大差别;在同样的太阳天顶角和地表时,还与大气状况有关,与无气溶胶大气相比,气溶胶有增强各向异性和改变辐射强度角分布型式的作用.

在低地表反照率的情况下,通道的各向异性转换系数  $g$  在小的卫星视角  $\theta$  的方向上均大于 1,而气溶胶则有使  $g$  的极大值增大及  $g$  的变化范围扩大的作用;在高地表反照率时,  $g$  的分布型式正好相反,气溶胶有使  $g$  的极小值减小,  $g$  的变化范围也扩大的作用.

在通道 1 和 2 的地表反照率有很大差别(如作物)的情况下,对较小的太阳天顶角,它们的各向异性转换系数  $g$  的分布型式正好相反,因而对这 2 个通道需作相反的各向异性订正.

在太阳天顶角不是很大时,在  $\theta=50^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$  左右的方向上,  $g$  近似为 1,因而这一方向上通道 1 和 2 的辐射测量可直接用来得到窄带行星反照率,并据此估算整个太阳光谱区的行星反照率.

由于 AVHRR 通道 1 和 2 的反射太阳辐射强度的角度分布有显著的各向异性,因而在由辐射测量得出行星反照率、地面反照率、植被指数和进行其它地面参数的遥感中,对大气的各向异性影响作订正是必要的.

本文只考虑了地表为朗伯散射面的情况,对实际的非各向同性散射地表,大气对反射太阳辐射各向异性的影响还需进一步研究.

### 参 考 文 献

- 1 Taylor V R and Stowe L L. Reflectance characteristics of uniform earth and cloud surfaces derived from Nimbus-7 ERB. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 4987~4996.
- 2 Pinty B and Ramond D. A method for the estimate of broadband directional surface albedo from a geostationary satellite. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 1709~1722.
- 3 汪宏七等. 在各向异性散射大气中用离散坐标法计算辐射传输的新进展. *科学通报*, 1989, **34**: 840~842.
- 4 Stamnes K, Tsay S-Chee, Wiscombe W and Jayaweera K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 2502~2509.
- 5 WCP-55, Deepak A and Gerber H E. Report on experts meeting on aerosols and their climatic effects. WMO, 1983, 103.

# EFFECTS OF ATMOSPHERE ON THE ANISOTROPIC CHARACTERISTICS OF REFLECTED SOLAR RADIANCES OF AVHRR CHANNELS

Wang Hongqi    Zhao Gaoxiang

*(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

## Abstract

Through radiative transfer calculations, the effects of atmosphere on the anisotropic transformation coefficients of reflected solar radiances of NOAA/AVHRR visible and near infrared channels have been investigated for some different solar zenith angles and some surfaces. Under the assumption of Lambert surfaces, the atmospheric aerosol has an effect on enhancing the anisotropy and modifying the pattern of angular distribution of reflected radiances.

**Key words:** Radiant intensity; Anisotropy; Aerosol.