

文章编号: 0253-2239(2010)04-0928-07

黄土高原半干旱地区 MODIS 反演气溶胶算法的地表反射率关系研究

白鸿涛¹ 陈勇航¹ 冯建东² 黄建平³ 张文煜³ 张强⁴ 郭 锐⁴ 王 胜⁴

(¹ 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; ² 四川省农业气象中心, 四川 成都 610072
³ 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; ⁴ 中国气象局兰州干旱研究所, 甘肃 兰州 730002)

摘要 参照 MODIS 遥感陆地上空气溶胶第二代算法(C005-L), 利用黄土高原半干旱地区(AERONET)(兰州大学半干旱气候与环境观测站, SACOL)的实测资料, 基于 6S 大气辐射传输模式, 分别用构建的 SACOL 气溶胶模型和 6S 的大陆型气溶胶模型对 MODIS/Terra 资料进行大气订正, 得到了 SACOL 区域春季可见光通道和近红外通道的地表反射率以及 0.66 μm vs2.12 和 0.47 μm vs0.66 地表反射率简单关系式, 并验证了三个通道的地表反射率关系及其随散射角和植被指数的变化。结果表明, 0.47 μm vs0.66 通道地表反射率关系比 0.47 μm vs2.12 通道地表反射率关系的相关性和稳定性更大, 0.47 μm vs2.12 地表反射率关系与散射角的相关性不大。

关键词 大气遥感; 地表反射率; 气溶胶; 大气订正; 散射角

中图分类号 P407.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103004.0928

Study of the Surface Reflectance Relationships Used in MODIS Retrieval Algorithm of Aerosols over the Semi-Arid Region of the Loess Plateau

Bai Hongtao¹ Chen Yonghang¹ Feng Jiandong² Huang Jianping³ Zhang Wenyu³
Zhang Qiang⁴ Guo Ni⁴ Wang Sheng⁴

¹ College of Environmental Science and Engineering, Donghua University of China, Shanghai 201620, China

² Agricultural Meteorological Center in Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China

³ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

⁴ Institute of Arid Meteorology of China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China

Abstract According to the second-generation (Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) retrieval algorithm of aerosol properties over land (C005-L), the atmospheric correction of MODIS/Terra data at Semi-arid climate and environment observatory of Lanzhou University (SACOL) of (Aerosol robotic network, AERONET) in the semi-arid region of the Loess Plateau was performed by respectively using the SACOL aerosol model based on surface observation and the continental aerosol model used in 6S. The surface reflectances of the visible and near-infrared channels of the SACOL area were obtained and the 0.66 μm vs2.12 and 0.47 μm vs0.66 surface reflectance relation and their change with scattering angle and vegetation index were verified. The results show that the correlation of surface reflectances between 0.47 μm and 0.66 μm is stronger and more stable than the one between 0.47 μm and 2.12 μm ; the surface reflectance relation of 0.47 μm vs2.12 μm is not dependent on scattering angle.

Key words atmospheric remote sensing; surface reflectance; aerosol; atmospheric correction; scattering angle

收稿日期: 2009-05-26; **收到修改稿日期**: 2009-08-31

基金项目: 国家 973 计划 (2006CB400501)、国家自然科学基金 (40830957) 和国家科技支撑计划重点项目 (2008BAC40B04) 资助课题。

作者简介: 白鸿涛 (1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事大气辐射与遥感等方面的研究。

E-mail: yanshumole@yahoo.com.cn

导师简介: 陈勇航 (1965—), 女, 博士, 副教授, 主要从事大气环境、大气辐射和大气气候领域等方面的研究。

E-mail: yonghangchen@yahoo.com.cn (通信联系人)

1 引言

我国黄土高原半干旱地区受自然和人类活动影响,气溶胶类型多样,且位于我国的沙尘源区,是卫星遥感陆地上空气溶胶反演研究的重要区域之一。根据中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感陆地上空气溶胶原理反演气溶胶信息,首先要确定的就是地表反射率。MODIS 遥感陆地上空反演气溶胶算法(C004-L)通过假定气溶胶对 $2.1 \mu\text{m}$ 通道表观反射率影响很小,表观反射率近似为地表反射率,利用经验关系 $\rho_{0.47}^{\delta} = 0.25\rho_{0.12}^{\delta}, \rho_{0.66}^{\delta} = 0.5\rho_{0.12}^{\delta}$,得到 $0.47 \mu\text{m}$ 和 $0.66 \mu\text{m}$ 通道的地表反射率,然后分别获取两个可见光通道的气溶胶光学厚度,从而得出全球陆地上空遥感大气气溶胶光学厚度。Chu 等^[1,2]对 MODIS 遥感陆地上空气溶胶算法(C004-L)得到的气溶胶光学厚度 τ 与国际气溶胶地面监测网(AERONET)地基遥感气溶胶光学厚度进行了线性回归分析,发现存在 0.1 的正截距,说明算法估算的地表反射率偏低。当陆地地表的信号与大气信号相当时,假设 $2.1 \mu\text{m}$ 地表反射率存在 0.01 的误差,使得反演的气溶胶光学厚度的误差达到 0.1 ^[3]。

2007 年 Levy 等^[4,5]对 MODIS 遥感陆地上空气溶胶算法进行了改进,建立了 MODIS 遥感陆地上空气溶胶第二代算法(C005-L),初步检验结果说明反演的光学厚度值有很大改进。2006 年 8 月,位于我国西北黄土高原的兰州大学半干旱气候与环境观测站 SACOL 加入了 AERONET^[6,7]。利用该 AERONET 站经过严格的校准、云掩码处理以及质量控制的资料,构建比以往更为精确的气溶胶模型,在此基础上基于 6S 大气辐射传输模式对 MODIS 资料进行大气订正,并参照 MODIS 遥感陆地上空气溶胶算法(C005-L),验证 SACOL 地区三个通道($0.47, 0.66$ 和 $2.12 \mu\text{m}$)地表反射率关系及其随散射角和植被指数的变化。

2 研究区域及资料

2.1 研究区域

MODIS 气溶胶产品(Level 2)的空间分辨率是 10 km 。在一个 10 km 的格点范围内,气溶胶光学厚度变化较小,但地表反射率空间变化较大。为了在更精细的空间分辨率上分析地表反射率的变化,本文选取以 SACOL 为中心的 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 面积作为研究区域。

2.2 大气订正的资料准备

AERONET 观测站将观测的直接太阳直射辐射的光谱消光,应用 Beer-Bouguer-Lambert 定律,直接反演得到几个波段($0.34, 0.38, 0.44, 0.67, 0.87$ 和 $1.02 \mu\text{m}$,其它波段取决于仪器)的光谱光学厚度。用水汽吸收通道反演出大气柱水汽含量(PW)。本文所用的为 AERONET 的 SACOL Version 2 Level 2.0 反演产品。

为减小气溶胶多次散射引起的误差,大气订正应选在晴空无云、气溶胶光学厚度较小的情况下进行。由于本文的研究区域春季频繁受沙尘影响,为使地表反射率具有代表性,选取 0.3 作为阈值^[8],大于 C005-L 算法所选的 0.2 。选出 2007 年春季(3~5 月)研究区域晴空无云(根据地面观测和卫星资料确定)且与卫星过境时间最接近的 $\tau_{550} < 0.3$ 的 MODIS 资料,最终确定出 8 天的 MODIS 资料来进行大气订正,如表 1 所示。

表 1 大气订正日期及气溶胶光学厚度与波长指数

Table 1 Dates and aerosol data used for atmospheric correction

Date	AOT(550 nm)	$\alpha_{440-870}$
March 21	0.2361	0.7665
March 27	0.2403	0.2761
April 18	0.1731	0.8638
May 1	0.2715	0.4348
May 4	0.1236	0.4371
May 5	0.1846	0.5473
May 24	0.2641	0.6740
May 28	0.2435	0.8905

进行大气订正中需要的几何条件、目标海拔高度和表观反射率取自 MODIS/Terra 影像中研究区域每个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 像素对应的太阳天顶角、卫星天顶角、太阳和卫星方位角及 MODIS 观测的反射率。大气模型通过输入水汽和臭氧浓度来确定,水汽质量浓度取自最接近卫星过境时次的 AERONET 的 SACOL 站点的气柱水汽资料,单位为 g/cm^3 ,臭氧浓度由 Ozone Monitoring Instrument(OMI)提供。气溶胶光学厚度(550 nm)取自表 1。由于粒子体积尺度分布和复折射指数可以唯一地确定出的气溶胶辐射特性:相函数(P)和单次散射反照率(ω_0)。因此将 AERONET 的 SACOL 站点的气溶胶体积尺度分布和复折射指数作为输入,来构建气溶胶模型(SACOL 气溶胶模型),进行大气订正。为了比较不同气溶胶模型对大气订正的影响,同时用 6S 模式中的大陆气溶胶模型进行了大气订正。

3 结果与讨论

3.1 VISvs2.12 地表反射率关系

用 SACOL 气溶胶模型基于 6S 模式对 MODIS 资料进行大气订正得到了三个通道的地表反射率。图 1(a)是可见光通道地表反射率与近红外通道地表

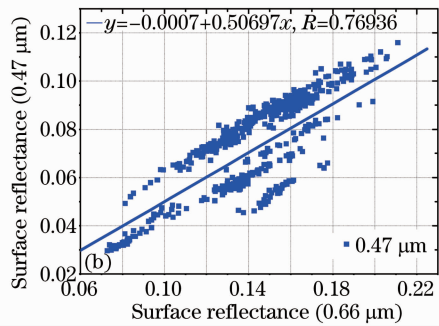
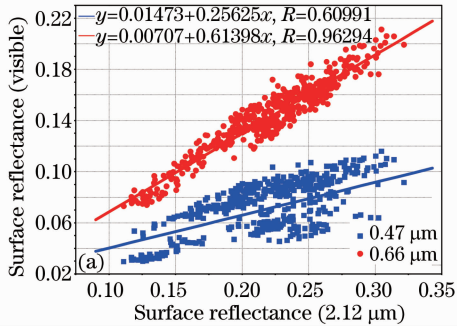


图 1 (a)可见光与近红外(2.12 μm 通道)地表反射率的比较,(b)0.47 μm 与 0.66 μm 通道地表反射率的比较

Fig. 1 Surface reflectance in the visible channels compared (a) with that in the 2.12 μm channel, (b) that in the 0.47 μm compared with that in the 0.66 μm channel

由图 1 可见,SACOL 地区 0.66 μm 和 2.12 μm 通道的地表反射率(0.66vs2.12)相关系数 R 为 0.96294, 0.47 μm 和 2.12 μm 通道地表反射率(0.47vs2.12)相关系数 R 仅为 0.60991。0.66vs2.12 的 y 轴截距 0.00707 接近于零,斜率 0.61398 大于 0.5 ($\rho_{0.66}^s = 0.5\rho_{2.12}^s$)。0.47vs2.12 的 y 轴截距为 0.01473,斜率为 0.25625,接近于 C004-L 算法中的固定比值 0.25 ($\rho_{0.47}^s = 0.25\rho_{2.12}^s$)。因此平均意义上讲,大气订正出的 SACOL 地区的 VISvs2.12 比不同于 C004-L 的假设。从图 2 可见 0.47 μm 和 0.66 μm 通道地表反射率(0.47vs0.66)与

0.47vs2.12 相比,有更高的相关系数 0.76936,且 y 轴截距值几乎为 0 (-0.0007)。

为比较 VISvs2.12 地表反射率关系的稳定性,将地表反射率回归曲线的 y 轴截距固定为零,得到一个新的回归方程,也就是假设 2.12 通道地表反射率为零,即在整个光谱上地表反射率均为零(相当于得到简单的关系比)。将 SACOL 地区 VISvs2.12 地表反射率关系 y 轴截距固定为零与不为零时的线性方程如表 2 所示,同时与 C005-L 算法中地表反射率关系进行比较。

表 2 SACOL 站点与 C005-L 的地表反射率的回归方程

Table 2 Regression correlation of surface reflectance of SACOL site and C005 algorithms

VISvs2.12	Y-intercept	Regression	
		C005-L	SACOL
0.66vs2.12	Forcing through zero	$\rho_{0.66}^s = 0.55\rho_{2.12}^s + 0.001$	$\rho_{0.66}^s = 0.61398\rho_{2.12}^s + 0.00707$
		$R = 0.932$	$R = 0.96294$
		$\rho_{0.66}^s = 0.55\rho_{2.12}^s$	$\rho_{0.66}^s = 0.64537\rho_{2.12}^s$
0.47vs2.12	Forcing through zero	$\rho_{0.47}^s = 0.259\rho_{2.12}^s + 0.011$	$\rho_{0.47}^s = 0.25625\rho_{2.12}^s + 0.01473$
		$R = 0.753$	$R = 0.60991$
		$\rho_{0.47}^s = 0.36\rho_{2.12}^s$	$\rho_{0.47}^s = 0.32171\rho_{2.12}^s$
0.47vs0.66	Forcing through zero	$\rho_{0.47}^s = 0.508\rho_{0.66}^s + 0.008$	$\rho_{0.47}^s = 0.50697\rho_{0.66}^s - 0.0007$
		$R = 0.873$	$R = 0.76936$
		$\rho_{0.47}^s = 0.54\rho_{0.66}^s$	$\rho_{0.47}^s = 0.50211\rho_{0.66}^s$
			$R = 0.76932$

表 2 为 SACOL 站点 SACOL 气溶胶模型与 C005-L 大气订正的可见光与近红外地表反射率, 0.47 μm 与 0.66 μm 通道地表反射率的回归方程。

可以看到, y 轴截距固定为零后,SACOL 地区的 0.66vs2.12 比值增大 5.11%,而 C005-L 不变。0.47vs2.12 的 y 轴截距固定为零和不为零的结果

差别很大,固定为零后 SACOL 模型比值增大 25.55%,C005-L 增大了 39%。0.47vs0.66 的 y 轴截距固定为零后斜率仅减小 -0.96%,C005-L 中比值增大 6.3%。

因此平均意义上讲,利用 SACOL 气溶胶模型进行大气订正得出的 SACOL 地区的 0.66vs2.12 与 0.47vs0.66 关系的相关性和稳定性均比 0.47vs2.12 关系更高。除了 0.66vs2.12 的比值大于 C005-L 的比值,SACOL 地区的 VISvs2.12 地表反射率关系与 C005-L 的结果基本上一致。

以上分析同时说明,应该直接用 0.47vs0.66 的关系来得到 0.47 μm 通道的地表反射率,也就是说首先利用 0.66vs2.12 关系估算出 0.66 μm 通道地表反射率,然后用 0.47vs0.66 的关系估算 0.47 μm 通道的地表反射率,可表示如下:

$$\begin{cases} \rho_{0.66}^s = f(\rho_{2.12}^s) \\ \rho_{0.47}^s = g(\rho_{0.66}^s) \end{cases} \quad (1)$$

式中 f 和 g 是不同的函数。

尽管 SACOL 地区 0.47vs0.66 比 0.47vs2.12 关系的相关性和稳定性更高,但图 1(b) 显示了 0.47vs0.66 关系散射性很大,尤其是 y 轴截距。因此,在应用 0.66vs2.12 和 0.47vs0.66 关系估算 0.66 μm 和 0.47 μm 通道的地表反射率时会产生较大的误差,进而使得反演的光学厚度的产生更大误差。依据 C005-L 算法,下面对影响地表反射率关系散射

性的参量进行试验。

3.2 VISvs2.12 地表反射率关系随散射角的变化

根据 Gatebe 等^[10,11]的测试结果,VISvs2.12 地表反射率关系对角度有依赖性。Levy 等发现与 VISvs2.12 地表反射率变化相关性最大的是散射角 θ 为

$$\theta = \arccos(-\cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos \phi) \quad (2)$$

式中 θ_0, θ, ϕ 分别表示太阳天顶角,传感器天顶角,相对方位角。散射角是太阳、地表和卫星传感器相对位置的结果。

依据 C005-L 算法,检验散射角对 SACOL 地区春季 VISvs2.12 地表反射率关系散射性的影响。根据散射角来搜集各个通道地表反射率数据,并分为大小相等的 16 个组(每组有 50 个数据点)。图 2 为其关系图,所有子图中的横坐标点为每组散射角的中间值,图 2(a) 画出的是散射角中间值对与散射角中间值相应的每个通道地表反射率的平均值。由于图 1(a) 和 1(b) 均显示了斜率和 y 轴截距对 VISvs2.12 μm 地表反射率的线性回归曲线的重要性,所以对 16 组中的每一组的 VISvs2.12 地表反射率进行线性回归分析,最后得到 16 组线性回归曲线的斜率、y 轴截距及相关系数 R ,图 2(b)~(d) 显示的是散射角中间值分别对相应的 VISvs2.12 地表反射率线性回归曲线的斜率、y 轴截距和相关系数的函数。

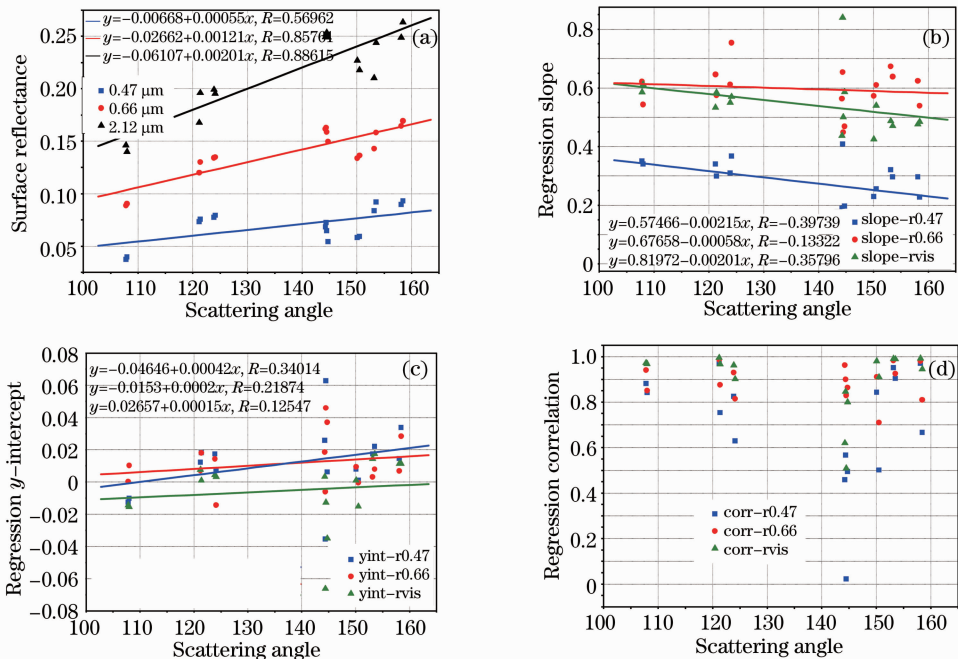


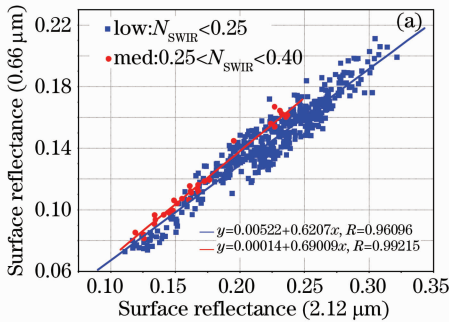
图 2 VISvs2.12 地表反射率关系对散射角的函数

Fig. 2 VIS vs2.12 surface reflectance relation as a function of scattering angle

图 2(a) 显示出 $0.66 \mu\text{m}$ 和 $2.12 \mu\text{m}$ 通道的地表反射率与散射角呈显著的正相关性, 而 $0.47 \mu\text{m}$ 通道的地表反射率与散射角关系不显著。图 2(b)~(d) 显示 VISvs2.12 地表反射率关系的斜率, y 轴截距和相关系数 R 对散射角的依赖性均很小, 即地表反射率关系与散射角的相关性不大。C005-L 中 $0.66\text{vs}2.12$ 斜率对散射角有依赖性, $0.47\text{vs}0.66$ 没有, 而 VISvs2.12 的 y 轴截距均对散射角有强烈的依赖性。

3.3 VISvs2.12 地表反射率关系随植被指数的变化

由于全球 AERONET 站点位于不同的地表类型区域, 因此 VISvs2.12 关系随地表类型和季节而变化^[4,5]。C005-L 算法将用于得到全球平均地表反射率关系的数据按照城市地区和非城市地区、不同地理位置(中纬度和热带)、不同季节(冬季和夏季)划分, 分别得出不同的 VISvs2.12 地表反射率关系。结果发现大部分非城市区域地表的地表反射率关系是植被的函数, 随植被生长情况而变化。因此选用对大气(气溶胶)具有不同敏感性, 且受气溶胶影响很小(沙尘气溶胶除外)的两个通



道: $1.24 \mu\text{m}$ 通道(MODIS 通道 5)和 $2.12 \mu\text{m}$ 通道(MODIS 通道 7)定义一个等差分植被指数 N_{SWIR} 来检验地表反射率关系随植被生长情况的变化。 N_{SWIR} 定义为

$$N_{\text{SWIR}} = (\rho_{1.24}^{\text{m}} - \rho_{2.12}^{\text{m}}) / (\rho_{1.24}^{\text{m}} + \rho_{2.12}^{\text{m}}), \quad (3)$$

式中 $\rho_{1.24}^{\text{m}}$ 和 $\rho_{2.12}^{\text{m}}$ 分别为 MODIS 测量的 $1.24 \mu\text{m}$ 通道和 $2.12 \mu\text{m}$ 通道的表现反射率。在没有气溶胶情况下, N_{SWIR} 与通常的 NDVI 有很高的相关性。若 $N_{\text{SWIR}} > 0.6$, 表示植被密集且生长旺盛, $N_{\text{SWIR}} < 0.2$ 表示植被稀疏。

图 3 分别用 SACOL 气溶胶模型订正出的 $0.66\text{vs}2.12$ 和 $0.47\text{vs}0.66$ 地表反射率关系随 N_{SWIR} 低、中值的变化(SACOL 地区不存在 N_{SWIR} 高值)。可以看出, 随着 N_{SWIR} 的增大, $0.66\text{vs}2.12$ 比值增大, 且两者的相关性也增大; $0.47\text{vs}0.66$ 比值随 N_{SWIR} 增大而减小到 0.45 , y 轴截距增大为 0.1645 , 而相关性显著增大到 0.9455 。C005-L 中 $0.47\text{vs}0.66$ 关系随 N_{SWIR} 的变化不强烈, 假设为常数。

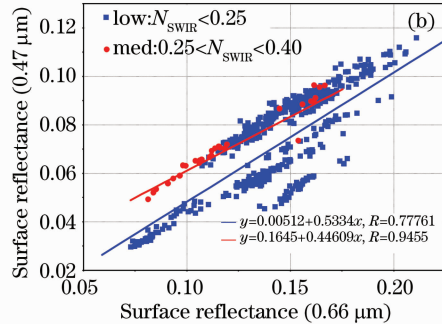


图 3 地表反射率关系对 N_{SWIR} 值(低值, 中值)的函数

Fig. 3 Surface reflectance as a function of bins of N_{SWIR} values (low, medium)

3.4 地表反射率关系的最终确定

由 3.2 和 3.3 节的试验结果可知, SACOL 气溶胶模型订正出的 VISvs2.12 地表反射率关系随散射角的变化不大, 且考虑到春季 SACOL 地区满足 N_{SWIR} 中值的像素点很少, 所以最终的 VISvs2.12 地表反射率关系不考虑 N_{SWIR} 的影响。因此, 最终确定的 SACOL 地区可见光与近红外通道的地表反射率简单关系如下:

$$\begin{cases} \rho_{0.66}^{\text{s}} = 0.614\rho_{2.12}^{\text{s}} + 0.007, \\ \rho_{0.47}^{\text{s}} = 0.507\rho_{0.66}^{\text{s}}. \end{cases} \quad (4)$$

同时用 6S 模式中的大陆气溶胶模型进行大气

订正, 结果表明, $0.47\text{vs}0.66$ 地表反射率散射性很大的 y 轴截距随散射角的变化并不大, 不考虑 N_{SWIR} 的影响, 最终确定出大陆气溶胶模型订正出的 SACOL 地区可见光与近红外通道的地表反射率简单关系为

$$\begin{cases} \rho_{0.66}^{\text{s}} = 0.633\rho_{2.12}^{\text{s}} + 0.004 \\ \rho_{0.47}^{\text{s}} = 0.536\rho_{0.66}^{\text{s}} - 0.014 \end{cases}, \quad (5)$$

表 3 列出了 C005-L 中纬度非城市地区不同季节的地表反射率关系, 与本文得出的 SACOL(中纬度、非城市站点)春季地表反射率关系进行比较。

表 3 C005-L 中纬度非城市站点冬季和夏季 VISvs2.12 地表反射率的线性回归方程

Table 3 Regression correlation of atmospherically corrected VISvs2.12 surface reflectance during winter and summer at non-urban mid-latitude sites

Channel	Non-urban mid-latitude sites during winter	Non-urban mid-latitude sites during summer
0.66vs2.12	$\rho_{0.66}^s = 0.484\rho_{2.12}^s + 0.009$ $R=0.919$	$\rho_{0.66}^s = 0.611\rho_{2.12}^s - 0.006$ $R=0.962$
0.47vs0.66	$\rho_{0.47}^s = 0.535\rho_{0.66}^s + 0.007$ $R=0.873$	$\rho_{0.47}^s = 0.513\rho_{0.66}^s + 0.007$ $R=0.937$

从表 3 看出, SACOL 地区春季 0.66vs2.12 和 0.47vs0.66 地表反射率关系同 C005-L 中的中纬度非城市地区夏季的地表反射率关系均比较接近, 但也存在差异。其中 0.66vs2.12 地表反射率关系比值均较高于中纬度非城市地区夏季的地表反射率关系, SACOL 的气溶胶模型和大陆气溶胶模型订正结果分别高为 0.49% 和 3.60%, 而两个模型订正出的 0.47vs0.66 地表反射率关系比值方向相反, SACOL 气溶胶模型减小 1.18%, 而大陆气溶胶模型则增大 4.48%, 且存在较大 y 轴截距。因此, SAOCL 气溶胶模型订正出的地表反射率关系同 C005-L 中的中纬度非城市地区夏季的地表反射率关系更为接近。

另外, C005-L 算法中统计结果表明, 绿色植被地表 0.66vs2.12 比值大于 0.55, 而在半干旱地区春季植被稀疏, 地表 0.66vs2.12 比值也大于 0.55, 可能与本文所选研究区域范围以及样本数有关, 具体原因有待进一步研究。

4 中国不同地区地表反射率关系的比较

表 4 列出了中国另两个 AERONET 站点: 香河

表 4 中国不同地区地表反射率关系的线性回归方程

Table 4 Regression correlation of surface reflectance relation at different regions in China

Location	0.66 vs 2.12	0.47 vs 0.66
SACOL (SACOL aerosol model)	$\rho_{0.66}^s = 0.614\rho_{2.12}^s + 0.007$ $R=0.9629$	$\rho_{0.47}^s = 0.507\rho_{0.66}^s$ $R=0.7694$
SACOL (Continental aerosol model)	$\rho_{0.66}^s = 0.633\rho_{2.12}^s + 0.004$ $R=0.9745$	$\rho_{0.47}^s = 0.536\rho_{0.66}^s - 0.014$ $R=0.8184$
Xianghe *	$\rho_{0.66}^s = 0.565\rho_{2.12}^s$ $R=0.9644$	$\rho_{0.47}^s = 0.477\rho_{0.66}^s + 0.006$ $R=0.8775$
Taihu *	$\rho_{0.66}^s = 0.486\rho_{2.12}^s + 0.03$ $R=0.8718$	$\rho_{0.47}^s = 0.881\rho_{0.66}^s - 0.018$ $R=0.8485$

5 结 论

选取春季气溶胶光学厚度小于 0.3 的 MODIS/Terra 资料, 基于 6S 大气辐射传输模式分别用

(39.75N, 116.96E) 和太湖 (31.42N, 120.21E) 的地表反射率关系^[8]。香河坐落于小城镇郊区, 距离北京东部 70~80 km, 属于中国北部乡村站点, 站点周围是农田且季节变化明显, 夏季主要为雨季, 植被生长茂盛, 而冬季和早春寒冷且干燥, 土地贫瘠。太湖站点坐落于中国东南部湿润地区, 位于上海的西北方向。

从表 4 看出, 位于不同地表类型的站点的地表反射率关系明显不同。SACOL 站点的 0.66vs2.12 关系比均大于香河和太湖, 太湖的 0.47vs0.66 关系比高达 0.881, 大于 SACOL 站点和香河的比值。分析有以下几点原因: 1) 与所处的地理位置、环境有关。SACOL、香河地区四季分明地表反射率变化可能比较大, 太湖地区常年处于温暖、潮湿气候中, 地表反射率的变化不明显; 2) 进行大气订正所选气溶胶光学厚度的阈值不同 (SACOL、香河为 0.3, 太湖为 0.4); 3) 所选时间段不同, SACOL 地表反射率关系仅为春季比值, 而该地区春季稀疏植被, 土壤较为贫瘠, 香河与太湖均为全年平均比值。

SACOL 气溶胶模型和大陆型气溶胶模型进行大气订正, 得到以 SACOL 为中心 10 km×10 km 区域的可见光通道和近红外通道的地表反射率, 并对三个通道的地表反射率关系以及随散射角和植被指数的

变化进行检验,结果表明:

1) SACOL 地区 0.47vs0.66 通道地表反射率关系比 0.47vs2.12 通道地表反射率关系的相关性和稳定性更大。

2) SACOL 气溶胶模型订正出 VISvs2.12 地表反射率关系随散射角 θ 和植被指数 N_{SWIR} 变化的试验结果表明,0.66vs2.12 通道的地表反射率与散射角 θ 呈显著的正相关性;VISvs2.12 地表反射率关系与散射角 θ 的相关性不大。

3) 大陆气溶胶模型订正出 VISvs2.12 地表反射率关系随散射角 θ 和植被指数 N_{SWIR} 的变化与 SACOL 气溶胶模型结果不同:0.47,0.66 和 2.12 μm 通道的地表反射率与散射角(存在正相关性;0.47vs2.12和 0.47vs0.66 地表反射率关系的斜率与散射角 θ 有正相关性;0.47vs2.12 地表反射率关系的 y 轴截距对散射角 θ 有一定的依赖性。

4) 用 SACOL 气溶胶模型和大陆型气溶胶模型进行大气订正得出春季 SACOL 地区 0.66vs2.12 和 0.47vs0.66 地表反射率简单关系比。

5) SACOL 地区春季 0.66vs2.12 和 0.47vs0.66 地表反射率关系同 C005-L 中的中纬度非城市地区夏季的地表反射率关系比较接近,但也存在差异。SAOCL 气溶胶模型订正出的地表反射率关系同 C005-L 中的中纬度非城市地区夏季的地表反射率关系更为接近。

6) 同中国香河地区和太湖地区的地表反射率关系相比,SACOL 地区的 0.66vs2.12 地表反射率关系比值最大,而 0.47vs0.66 的地表反射率关系比介于香河和太湖之间。可能与所处的地理位置、环境有关,以及进行大气订正所选气溶胶光学厚度的阈值和所选时间段不同有关。

致谢 感谢由美国航空航天局(NASA)的戈达德太空飞行中心和兰州大学半干旱气候与环境观测站为

本文提供资料。

参 考 文 献

- 1 D. A. Chu, Y. J. Kaufman, C. Ichoku *et al.*. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(12): art. no.-1617
- 2 L. A. Remer, Y. J. Kaufman, S. Mattoo *et al.*. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**(4): 947~973
- 3 Y. J. Kaufman, D. Tanre, H. R. Gordon *et al.*. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D14): 16815~16830
- 4 R. C. Levy, L. A. Remer, S. Mattoo *et al.*. Second-generation operational algorithm; retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007a, **112**
- 5 R. C. Levy, L. A. Remer, O. Dubovik. Global aerosol optical properties and application to MRIS aerosol retrieval over land[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007b, **112**
- 6 Peng Nina, Yi Weining, Ma Jinji *et al.*. Atmospheric correction of QuickBird-2 imagery for turbid water coastal areas using MODIS data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 817~821
彭妮娜, 易维宁, 麻金继等. 利用 MODIS 数据进行 QuickBird-2 卫星海岸带图像大气校正研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 817~821
- 7 J. P. Huang, W. Zhang, J. Zuo *et al.*. An overview of the semiarid climate and environment research observatory over the loess plateau[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25**(6): 906~921
- 8 Wen Mi, Zhanqing Li, Xiangao Xia *et al.*. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(D22): 8423
- 9 Y. J. Kaufman, N. Gobron, B. Pinty *et al.*. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm-theory [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(23): 31.1~31.4
- 10 C. K. Gatebe, M. D. King, Si-Chee Tsay *et al.*. Sensitivity of off-nadir zenith angles to correlation between visible and near-infrared reflectance for use in remote sensing of aerosol over land [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39** (4): 805~819
- 11 L. A. Remer, A. E. Wald, Y. J. Kaufman *et al.*. Angular and seasonal variation of spectral surface reflectance ratios: implications for the remote sensing of aerosol over land[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39**(2): 275~283