

文章编号: 1007-4619(2003)05-0372-07

气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式及其应用

何立明¹, 王 华¹, 阎广建¹, 李小文^{1,2}, 朱文娇¹, 王锦地¹

(1. 北京师范大学遥感与GIS研究中心, 北京 100875; 2. Center for Remote Sensing, Dept. of Geography, Boston University, USA)

摘要: 气溶胶光学厚度作为描述气溶胶光学特性的重要参数之一, 在辐射传输和大气订正中被广泛应用。与此同时, 被广泛应用的大气辐射传输软件 MODTRAN 却采用水平气象视距作为其输入参数, 两者之间在遥感应用中存在“脱节”。将两者联系起来对于气溶胶数据的合理利用是很有用的。本文的分析表明两者之间的关系随气溶胶垂直廓线的分布不同而异, 为此, 本文根据 MODTRAN 的模拟结果归纳出一个经验公式, 分析表明, 不同季节经验公式的系数是不同的, 不考虑这种差异时, 从相同的气象视距下转换得到的气溶胶光学厚度的误差最大可达 0.029。最后我们将经验公式用于大气订正中。

关键词: 气象视距; 气溶胶光学厚度; MODTRAN 6S; 经验公式; 应用

中图分类号: TP79/P407 **文献标识码:** A

1 引言

气溶胶对全球变化的影响是近几十年一个被广泛讨论的问题^[1], 气溶胶对大气信号的消光作用是许多辐射传输程序必须要考虑的主要问题之一。一般而言, 对气溶胶浓度可以从垂直和水平两种方式描述^[2,3]; 气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth) 和水平气象视距 (Horizontal Meteorological Range)。

一方面, 气溶胶光学厚度作为标志气溶胶光学特性的一个重要参数被广泛应用于遥感中。比如, 在其测量方面, AERONET (Aerosol Robotic Network) 采用标准的太阳辐射计 (Sun/Sky Photometers) 测量了大量的气溶胶光学厚度数据, 这些数据将用于全球的气溶胶检测, 并且被常规的气溶胶反演方案选为检验其精度的标准^[4]; MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 有气溶胶光学厚度产品^[5], 并将其测量的气溶胶光学厚度作为其大气订正的输入参数之一; MISR (Multi-angle Imaging Spectroradiometer) 的一个主要功能是检测全球的气溶胶^[6], 其气溶胶产品更是直接应用于其大气订正中。光学厚度的精度是影响大气订正精度的主要因素之

—[7]。

另一方面, 被公认的比较精确的大气辐射传输软件, 如 MODTRAN (Moderate Resolution Model for LOWTRAN7)^[8], 却采用水平气象视距而不是光学厚度作为其输入参数, 被广泛应用于大气和遥感研究中^[9]。尽管描述气溶胶浓度水平特性的参数, 如水平气象视距和能见度, 可以从气象台站获得, 但是在一般的遥感应用中更为普遍的还是用气溶胶光学厚度, 而且由于能见度的测量误差较大 (其原因在于其定义的主观性, 在第 2 节分析), 而很难被选为输入参数。

当前, 有许多大气订正软件如 FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)、ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction for Airborne Scanner Data)、ACORN (Atmospheric Correction Now) 都是以 MODTRAN 作为基本的辐射传输计算程序。但是遗憾的是, 尽管采用水平气象视距有其优越性, MODTRAN 采用气象视距作为输入参数还是给利用大量的气溶胶光学厚度数据带来了不便。而且即使在 MODTRAN 程序内部, 气象视距的作用仅仅是作为插值的参数来计算消光系数, 在进行运算时并没有用到水平气象视距。因此, 进行气

收稿日期: 2002-05-13; 修订日期: 2002-12-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2000QG77900)、国家自然科学基金项目 (40101020)、863 项目 (2001AA131030) 共同资助。

作者简介: 何立明 (1977—), 男, 1999 年 7 月毕业于烟台师范学院地理系, 获学士学位; 现在北京师范大学资源与环境科学系遥感与 GIS

研究中心攻读博士学位, 从事地表组分温度反演和大气订正等工作, 已发表相关论文 2 篇。

溶胶光学厚度和水平气象视距之间的转换是经常遇到的事情。

Elteman^[10]最初考虑了地表水平气象视距和大气最下面 5km 厚度的气溶胶消光廓线联系起来的可能性。在假定气溶胶消光廓线随高度指数分布的假定下,得到了 2—13km 范围内 8 种气象视距下两者的转换关系,他没有考虑季节变化的影响。6S^[11]继承了 Elteman 等的思路,它提供了两种形式的接口,既可以输入气溶胶光学厚度也可以输入能见度,程序将进行转换。通过对 6S 进行气溶胶光学厚度和能见度转换的结果分析发现,其转换在能见度较大和较小时精度不高,而且,其转换公式并没有考虑季节变化的影响。Turner^[12]曾给出了能见度和 MSS 几个波段光学厚度的对应表,但由于其针对性而难以推广,而且他也没有考虑气溶胶的季节变化。由于气溶胶光学厚度的精度是影响辐射传输的主要因素之一,因此,更细致地讨论两者的关系还是有必要的。

本文旨在对他们两者之间的关系给出一个合适的解释和分析,并给出一个适合于不同季节变化等因素的经验公式。在本文第 2 节中,将讨论两者的差异,在第 3、4 节中给出了 6S 和 MODTRAN 的水平气象视距和垂直气溶胶光学厚度算法并作了比较,在第 5 节中给出了利用 MODTRAN 模拟的结果得到的水平气象视距和气溶胶光学厚度转换的关系式,在第 6 节给出了应用于大气订正的实例。根据本文提供的思路,用户可以用 MODTRAN 对不同的气溶胶模式进行模拟,以得到两者之间的关系。结果表明,得到的经验公式简便、准确,可以满足一般的遥感应应用。

2 水平气象视距与气溶胶光学厚度概述

水平气象视距和能见度是两个经常在文献中被混淆的术语^[3,13,15]。能见度是观测者在无辅助设施下,用正常视力肉眼能够观察和识别的最大距离。观测目标为:在白天,以地平天空为背景的黑暗物体;夜间,已知的中等强度的光源。能见度的观测误差很大,不同的观测者往往给出不同的结果,为了消除观测者主观因素及昼夜差别的影响, Koschmieder 定义了气象视距(单位为 km)为:

$$V = \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{\epsilon} \quad (1)$$

此处 β 是分子和气溶胶在 0.55 μm 波长处的总消光系数, ϵ 是对比度阈值,等于 $\frac{1}{50}$,这个值是以人眼最敏感的波长 0.55 μm (绿光)和视觉域为依据的。

如果仅有观测能见度 V_0 (单位为 km),可用下式估计气象视距 V ^[15]:

$$V = (1.3 \pm 0.3) V_0 \quad (2)$$

LOWTRAN、MODTRAN 采用了(1)式,用气象视距作为输入参数,给出的公式为:

$$V = \frac{\ln(50)}{\text{EXT}550 + 0.01159} \quad (3)$$

这里, EXT550 是地表气溶胶的消光系数,0.01159 是地表瑞利散射的消光系数(550nm 处),两者之和即为(1)式中的总消光系数。值得注意的是,6S 则是采用能见度(Visibility)作为输入参数。

在水平均匀大气中,引入大气气溶胶光学厚度^[2]:

$$\tau_a = \int_{z_1}^{z_2} k(z) dz \quad (4)$$

这里, $k(z)$ 是气溶胶的消光系数,包括吸收系数和散射系数, z_1 是地表的高度, z_2 是大气层顶的高度(一般取为 100km)。

因此,气溶胶光学厚度与气溶胶消光系数廓线的分布有关;而水平气象视距则仅仅和地表的大气消光系数有关,因此,水平气象视距和气溶胶光学厚度之间没有直接的联系,也很难用一个统一的公式来表达二者的关系。在这里,我们仅仅讨论波长 550nm 处不同季节、不同气溶胶类型等条件下的气溶胶光学厚度同水平气象视距的关系,其它波段的气溶胶光学厚度同 550nm 处的光学厚度的关系可以根据 Ångström 公式得到^[13],此处不再详述。

3 6S 提供的能见度和气溶胶光学厚度转换算法

为了提高 6S 程序的通用性,6S 提供了能见度 (V_0) 和 550nm 处气溶胶光学厚度 (τ_{550}) 的转换算法^[11]。在从 τ_{550} 到 V_0 的转换时依据以下公式:

$$V_0 = \exp(-\log(\tau_{550}/2.7628)/0.79902) \quad (5)$$

在从 V_0 到 τ_{550} 进行转换时,程序根据 V_0 插值得到 τ_{550} 的值。6S 存储了 $V_0=5\text{km}$ 和 23km 时的粒子数密度廓线,其它 V_0 下的气溶胶数密度廓线采用对 V_0 插值的方法来得到。在得到从地表到大气顶各层的气溶胶数密度后,各层的消光系数就可以被计算出来,光学厚度由消光系数对高度积分得到。显然,这里只用了两种气溶胶数密度下的廓线,而不考虑廓线随季节、湿度等变化,从第 5 节的分析可以看出,这将带来一定的误差。具体算法可以参见其用户手册。

表 1 6S 计算结果
Table 1 Calculated result using 6S

输入 V_0	4	5	8	10	15	20	23	30	40	50
气溶胶光学厚度	0.9537	0.78	0.5191	0.4321	0.3156	0.2576	0.2347	0.1991	0.1696	0.1518
输出 V_0	3.79	4.87	8.1	10.2	15.11	19.48	21.89	26.89	32.87	37.76

我们对其转换过程进行了验证,方法是:运行 6S 输入 V_0 ,程序计算出 τ_{550} ;以其输出的 τ_{550} 输入,程序将根据公式计算出 V_0 ;这样程序初次运行时输入的 V_0 和第二次得到的 V_0 应该基本一致。结果如表 1 所示。可以看到,正如其用户手册所言,在 V_0 较小时(小于 5km 时)其误差是较大的。其实,在 V_0 较大时两者转换的差别也比较大。因此,在 V_0 和 τ_{550} 的转换关系上,6S 的公式也有待改进。

4 MODTRAN 的气溶胶光学厚度算法

MODTRAN 基本采用了 LOWTRAN 的气溶胶模式并作了改进^[8,13,14]。LOWTRAN 给出了多种气溶胶数密度的垂直廓线。在 LOWTRAN 的气溶胶模式中粒子谱分布函数分为两个部分,即:

$$\frac{dN_i}{dr} = N(z, V) n(r) \quad (6)$$

其中 N_i 是粒子总数密度; $N(z, V)$ 为与高度 Z 和水平气象视距 (V) 有关的密度系数; r 为粒子半径; $n(r)$ 是控制粒子谱分布形状的谱形函数。LOWTRAN 规定:在某个指定高度区间内谱形函数 $n(r)$ 不随高度发生变化,仅仅密度系数 $N(z, V)$ 有改变。换句话说,在区间的任意高度粒子谱分布形状均相同。因此气溶胶消光系数 $k_e(\lambda)$ 可作变量分离:

$$\begin{aligned} k_e(\lambda) &= N(z, V) \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(m, \lambda, r) n(r) dr \\ &= N(z, V) \cdot EXT(\lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

这里 λ 为波长; Q_e 是 Mie 消光效率因子, m 是折射指数; $EXT(\lambda)$ 为消光系数, LOWTRAN 程序中的消光系数以 $\frac{EXT(\lambda)}{EXT(0.55)}$ 的形式存放于数据块文件里以备调用。

在光程 (z_1, z_2) 里,由于气溶胶的存在引起的透过率的 T_a 为

$$T_a = \exp\left[-\int_{z_1}^{z_2} N(z, V) \cdot EXT(\lambda) m_a(z) dz\right] \quad (8)$$

其中, $m_a(z)$ 为大气质量。

通常 LOWTRAN 在由气象视距 V 确定气溶胶粒

子数密度廓线时,将大气分为 5 个高度区间^[13]: 0—2km 高度区间,有气象视距 $V=2, 5, 10, 23, 50$ km 五个 $N(z, V)$ 数据库,其它气象视距(如用户指定的水平气象视距)下的粒子数密度可以用内插法求得。这个高度区间的气溶胶密度系数 $N(z, V)$ 与季节变化无关; 2—4km 高度区间,有气象视距 $V=23, 50$ km 两个数据库,其它气象视距的 $N(z, V)$ 同样可以用内插获得。注意该区间的气溶胶密度系数与季节变化有关,有春夏季、秋冬季两套资料可供选择; 4—10km 高度区间,气象视距 $V=50$ km, $N(z, 50)$ 直接赋值,无气象视距选择,但有季节变化,同样有春夏季、秋冬季两组资料可选; 10—30km 高度区间,气溶胶粒子数密度系数 $N(z)$ 与气象视距无关,但除了同样与季节变化相关,即可选春夏季或者秋冬季两项指标外,在平流层还有四个与火山有关的数据库可供选择。30—100km 高度区间, $N(z)$ 与气象视距无关,相应也有 4 个与火山有关的气溶胶数据库。

另外,有资料表明^[13],环境相对湿度从 0.0 变化到 88%,气溶胶的粒子半径可增大 40%。所以,LOWTRAN 将相对湿度分为四级, $RH=0, 70%, 80%, 99%$,建立气溶胶消光系数和吸收系数库,其它相对湿度下的值可插值求得。LOWTRAN 中 0—2km 和 2—10km 高度有与相对湿度有关的气溶胶数据库,其它高度区间的气溶胶特性与相对湿度无关。

在输入参数时,MODTRAN 要求输入 V ,根据 V 和用户选择的季节、水汽量等插值得到消光系数,然后对高度积分得到气溶胶光学厚度。因此,MODTRAN 从 V 得到的气溶胶光学厚度要比 6S 更符合实际情况。利用 MODTRAN 的大气透过率计算功能可以得到水平气象视距和气溶胶光学厚度的关系。在 MODTRAN 中,输入水平气象视距值 V ,可以计算出整层大气的透过率,它同时也给出气溶胶的透过率。根据 Lambert-Beer 定律,可以得到

$$\tau_a = \int_{z_1}^{z_2} N(z, VIS) \cdot EXT(\lambda) m_a(z) dz = -\ln T_a \quad (9)$$

这样通过得到不同 V 、不同季节下的气溶胶光学厚度,我们就分别可以得到它们之间的关系。

5 用 MODTRAN 模拟水平气象视距和气溶胶光学厚度的经验公式

我们给出了三种气溶胶类型(乡村、城市、海洋)、两种季节变化(春夏、秋冬)、三种水汽量($0g/cm^2$ 、 $3g/cm^2$ 、 $6g/cm^2$)下用 MODTRAN4 模拟的结果。作为示例,我们画出了乡村气溶胶模式春夏和秋冬气溶胶廓线下(三种水汽含量)气溶胶水平气象视距和气溶胶光学厚度的关系(图 1),由于水汽对两者关系的影响非常小,图中表示不出来。

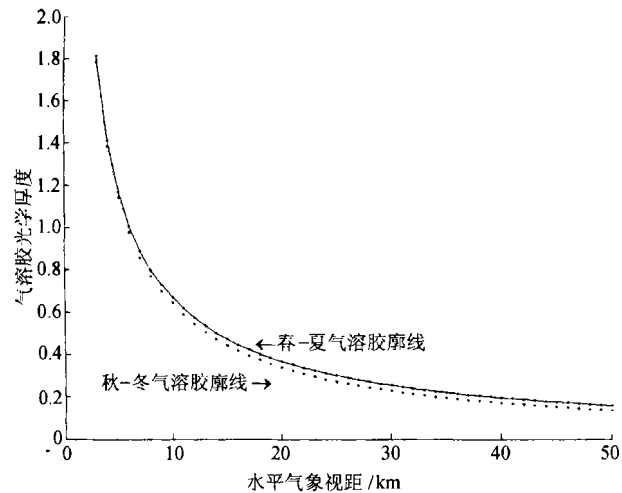


图 1 乡村气溶胶模式下水平气象视距和气溶胶光学厚度散点图

Fig.1 The relative between Meteorological Range and Aerosol Optical Depth

另外,根据图 1 中的数据,从 V 和 $\frac{1}{\tau_{550}}$ 的关系可以看出(图 2),两者呈很好的线性关系。通过拟合图 1 中的数据发现,采用

$$\frac{1}{\tau_{550}} = a \cdot V + b \quad (10)$$

这样一个简单关系能更好的拟合模拟得到的数据,结果如表 2 所示。这在水平气象视距非常小($V < 6km$)和非常大时($V > 45km$)误差稍大,但仍比 6S 的计算结果要高,而且这种情况在一般的遥感应用中比较少见。

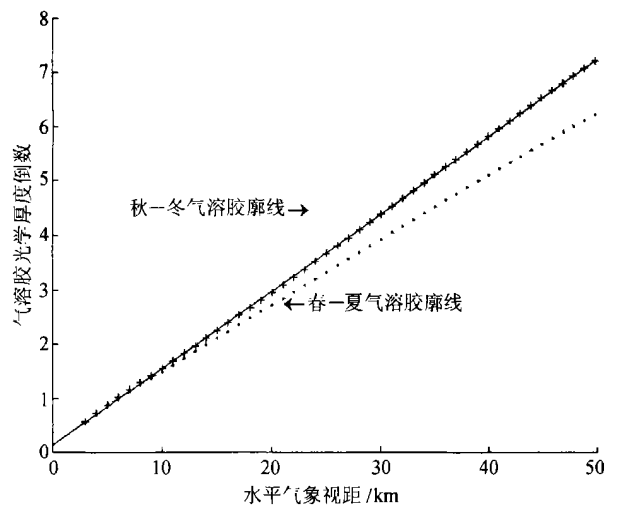


图 2 水平气象视距和气溶胶光学厚度倒数之间的散点图

Fig.2 Relative between Meteorological Range and reciprocal of aerosol optical depth

表 2 用 MODTRAN4 的输出数据来拟合公式(10)的斜率和截距(a :斜率; b :截距)

Table 2 Slope and intercept of formula (10) using MODTRAN4 simulation

		$0g/cm^2$		$3g/cm^2$		$6g/cm^2$	
		a	b	a	b	a	b
城市	春夏	0.1202185	0.29737503	0.12021654	0.29735036	0.12022071	0.29739269
	秋冬	0.1418833	0.13768914	0.14188239	0.13772545	0.14188239	0.13772545
乡村	春夏	0.12022071	0.29739269	0.12022071	0.29739269	0.12022071	0.29739269
	秋冬	0.14188239	0.13772545	0.14188239	0.13772545	0.14188239	0.13772545
海洋	春夏	0.12020535	0.29728266	0.12020052	0.29693376	0.12019968	0.29696743
	秋冬	0.14184644	0.13784325	0.14182045	0.13797736	0.14182045	0.13797736

如前面所述,平流层气溶胶的浓度会随火山活动改变,但除非火山爆发,其气溶胶浓度相对比较稳定,因此模拟中采用了背景气溶胶廓线。由于 MODTRAN 在计算透过率时将分子透过率和气溶胶

透过率分别计算,因此,大气模式的选择只影响分子透过率的计算,而不影响气溶胶的透过率,模拟的结果也说明了这一点,因此这里没有一一列出各种大气模式下的计算结果。对气溶胶透过率影响最大的

因素是气溶胶廓线的季节变化。因此,这里拟合结果分春夏季和秋冬季两大类给出。

我们对 MODTRAN 模拟得到的数据、利用公式(10)得到的结果和 6S 得到的结果进行了比较(表 3)。表中是乡村气溶胶模式下的计算结果。表中,“能见度”一列是由公式(2)根据水平气象视距计算,C 列、D 列是直接利用 MODTRAN 计算得到的气溶胶

光学厚度,“6S”列是用 6S 程序根据最左边的能见度计算的气溶胶光学厚度,G 列、H 列是用公式(10)根据表 2 计算的气溶胶光学厚度,C-G 和 D-H 分别是春夏和秋冬气溶胶模式下模拟得到的数据和利用公式(10)得到的气溶胶光学厚度之间的差。可以看到,在能见度较大和较小时,6S 和 MODTRAN 计算的气溶胶光学厚度有较大的差别。

表 3 乡村气溶胶模式下计算结果比较(表中第二列至最后一列的单位为气溶胶光学厚度)

Table 3 Result compared with other algorithm for Rural Aerosol Model

气象视距/km	能见度/km	乡村春夏(C)	乡村秋冬(D)	6S	差值(C-D)	乡村春夏(G)	乡村秋冬(H)	C-G	D-H
6	4.615	1.0062	0.9771	0.8388	0.0291	0.9816	1.0111	0.02459	-0.034
7	5.385	0.8884	0.8592	0.7303	0.0292	0.878	0.8842	0.01042	-0.025
10	7.692	0.6733	0.6442	0.5367	0.0292	0.6668	0.6424	0.0065	0.00172
13	10	0.5355	0.5063	0.4321	0.0291	0.5376	0.5045	-0.0021	0.00184
18	13.85	0.4033	0.3741	0.3352	0.0292	0.4063	0.3715	-0.003	0.00259
23	17.69	0.3248	0.2956	0.2804	0.0292	0.3265	0.294	-0.0018	0.00155
26	20	0.2897	0.262	0.2576	0.0277	0.2921	0.2613	-0.0024	0.00069
30	23.08	0.2539	0.2277	0.2342	0.0262	0.2561	0.2276	-0.0023	8.1E-05
35	26.92	0.2205	0.1958	0.2125	0.0248	0.222	0.1959	-0.0014	-0.0002
39	30	0.2	0.1761	0.1991	0.0239	0.2006	0.1763	-0.0005	-0.0002
45	34.62	0.176	0.1532	0.1834	0.0229	0.1752	0.1533	0.00081	-0.0002
50	38.46	0.1605	0.1382	0.1732	0.0223	0.1585	0.1383	0.002	-5E-05

相对湿度的变化对气溶胶消光特性也有影响。模拟结果显示,相同的水平气象视距下,水汽量从 $0g/cm^2$ 变化到 $6g/cm^2$ 时,引起的气溶胶光学厚度一般在 $1/1000$ 以下。其中水汽量对乡村气溶胶模式基本没有影响,这是因为 $3g/cm^2$ 的水汽量对乡村气溶胶模式来说已经达到饱和。另外,三种气溶胶模式(城市、乡村、海洋)对 V 和 τ_{550} 的影响也不大。

6 应用实例:大气订正

2001年4月11日,我们进行了 AMTIS(Airborne Multi-angle TIR/NIR Imaging System-AMTIS)的飞行实验,共获得了顺义地区共三个航带的的数据,同时进行了同步的大气参数和地表 BRDF 观测,其中用太阳辐射计分离出 $550nm$ 处气溶胶的光学厚度,顺义实验飞行期间最小的光学厚度为 0.2635,最大值为 0.3573。

要对 AMTIS 飞行数据进行大气订正,需要精确的同步气溶胶信息,然后运行大气辐射传输方程,得

到大气订正公式中的透过率等参数。MODTRAN 是最常用的大气辐射传输方程之一,本文的大气订正即采用它来创建大气参数查找表。但是如前所述,运行 MODTRAN,需输入的气溶胶参数是水平气象视距而不是气溶胶光学厚度,而顺义实验中所测量的是整层的气溶胶光学厚度,从而无法直接应用于 MODTRAN 中,为此,根据公式(10)和表 2 将所测的气溶胶光学厚度转换为 MODTRAN 所需的水平气象视距,然后再运行 MODTRAN。

本文选取了顺义地区小样地及其附近区域数据进行大气订正实验。基于 BRDF 大气订正环的途径和核驱动模型^[16-18]和用 MODTRAN 创建的大气参数查找表,加入地表先验知识,对 AMTIS 的可见光、近红外波段数据进行了大气订正,并根据地面数据进行了验证。订正结果表明,大气订正后,有效地去除了大气的“平滑”作用,使图像的高频信息得到了恢复,得到的结果如图 3 所示。这从一个侧面说明了大气订正中提供精确的气溶胶信息的重要性,而本文的公式则提供了从气溶胶光学厚度到 MOD-

TRAN 所需的水平气象视距转换的“桥梁”。限于篇幅,大气订正的具体方法将另文讨论^[19]。

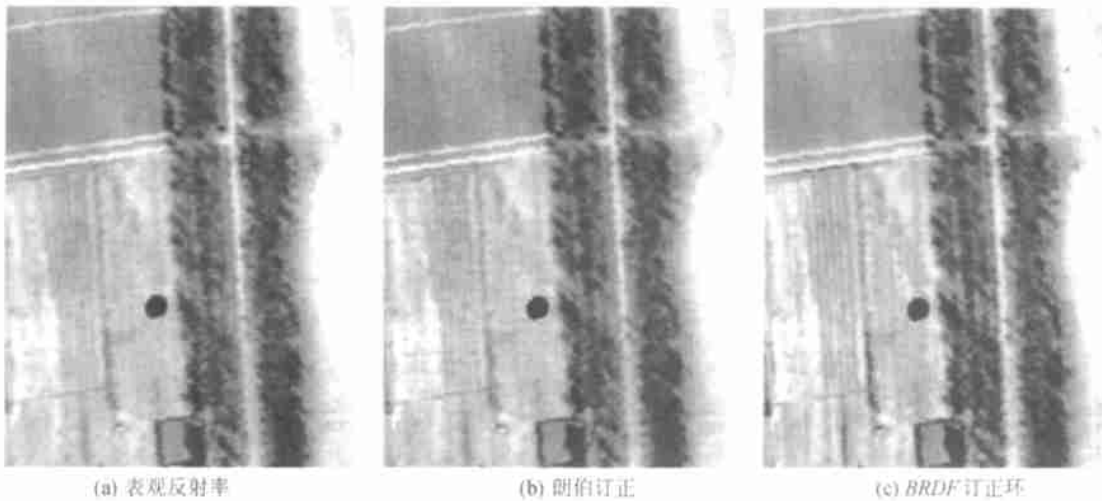


图3 订正前后图像的比较

Fig.3 Images of Apparent Reflectance(a), Lambert(b) and BRDF Loop Based(c) Atmospheric Correction

7 讨论和结论

(1) 我们给出了三种气溶胶类型、两种季节变化、三种水汽量下用 MODTRAN 模拟得到的经验公式的系数,同 6S 比较,更适合实际情况。

(2) 模拟结果显示,气溶胶廓线的季节变化是影响两者关系的主要因素。不考虑这种季节差异,在相同的水平气象视距下,转换带来的气溶胶光学厚度的误差可以达到 0.029(表 3)。由于 MODTRAN 仅仅提供了秋冬和春夏两种选择(统计平均的结果),对于这两者之间的时间段而言,如冬春、夏秋之间的回归系数,可以通过内插来得到。

(3) 三种气溶胶类型(城市、乡村、海洋)的变化对两者的关系影响很小。这里,所谓三种气溶胶类型的差异在 MODTRAN 中仅仅存在于 0—2km 边界层(Boundary Layer)。它们的差异表现为相函数和吸收特性的不同。城市气溶胶的吸收比较大,当 V 从 3km 变化到 50km 时,由于吸收引起的透过率可从 60%变化到 96%。但是这种差异在这里却并不影响两者的关系,其原因在于,在 MODTRAN 中,当给定 V 后,0—2km 内气溶胶物质的总量 $N(V, Z)$ 和垂直分布廓线就同时被决定了(参见公式(7)、(8),对三种不同的气溶胶类型, V 决定了边界层的总消光。它们三种气溶胶类型的吸收系数确实有差异,因此,在同样的 V 下,它们三种气溶胶的散射消光系数也不相同,这种差异,在计算辐射率时,考虑多次散射的情况下就会表现出来。从以上说明可以知道,气

溶胶类型的差异不影响二者的关系是可以理解的。另外,由于气溶胶的多变,MODTRAN 还提供了沙漠、雾等气溶胶模式,但是这几种气溶胶的空间分布差异太大,而难以给出结果,这里未作分析。

(4) 尽管相对湿度的变化会影响气溶胶的消光特性,这里的模拟结果表明,对于研究二者的关系而言,水汽量的影响很小,可以忽略不计。

另外,由于模拟很难穷尽各种大气和气溶胶状况,因此,这里模拟时假定地表海拔高度为零,对于其它海拔高度下的关系,根据本文提供的思路,也可以很方便地得出二者之间的关系。

致谢 感谢马里兰大学梁顺林教授的指导;感谢中科院遥感所肖青博士、国家气象局气象卫星中心胡秀清先生的讨论。

参考文献(References)

- [1] R. J. Charlson, S. E. Schwartz, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. *Science*, 1992, **255**:423—430.
- [2] Liou K. N., An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Academic Press Inc., New York, 1980.
- [3] Zhang Cheng-chang, Zhou Wen-xian, Tutorial of Atmospheric Aerosol [M]. Meteorology Press, 1995, Beijing. [大气气溶胶教程[M], 章澄昌、周文贤编著, 1995, 气象出版社, 北京.]
- [4] Dubovik, O., A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker, Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements[J]. *J. Geophys. Res.* 2000, **105**:9791—9806.
- [5] Michael D. King, Yoram J. Kaufman, *et al.* Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Reso-

- lution Imaging Spectrometer (MODIS) [J]. *IEEE Trans. On Geo. And Remote Sensing*. 1992, **30**(1):2—27.
- [6] John V. Martonchik, David J. Ding, *et al.* Techniques for the Retrieval of Aerosol Properties Over Land and Ocean Using Multiangle Imaging [J]. *IEEE Trans. On Geo. And Remote Sensing*, 1998, **16**(4):1212—1227.
- [7] Asrar, Ghassem. Theory and Application of Optical Remote Sensing [M]. A Wiley-Interscience Publication, Chapter 9, 1989.
- [8] Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, *et al.* MODTRAN⁴ USER'S MANUAL [R]. 1999, 6.
- [9] M. W. Matthew, S. M. Adler-Golden, *et al.* Status of atmospheric correction using a MODTRAN⁴ based algorithm [R]. SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research, III, Volume 3756, 1999, 7.
- [10] Elteman, L. 1970; Relationships between vertical attenuation and surface meteorological range [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9, 1804—1810.
- [11] Vermote, E.F., *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum; user manual [R], University of Maryland, 1994.
- [12] Turner R.E. and Spencer M., Atmospheric model for correction of spacecraft data [J]. *Proc 8th intern. Symp. On rem. Sens. Environ.*, 1972.
- [13] Wu Bei-ying *et al.* Practicality Algorithm for Atmospheric Radiation Transfer [M]. Meteorology Press, Beijing, 1998, 9. [大气辐射传输实用算法 [M], 吴北婴等编著, 气象出版社, 1998 年 9 月, 北京.]
- [14] Kneizys, F.X., E.P. Shettle, L.W. Abreu, J.H. Chetwynd, G. P. Anderson, W.O. Gallery, J.E.A. Selby, and S.A. Clough, "Users Guide to LOWTRAN 7" [R]. AFGL-TR-88-0177 Geophysics Directorate/GPOS, 29 Randolph Rd., Hanscom AFB, MA01731-3010, (August 1988) ADA206773.
- [15] Gordon, J.I. (1970), Daytime Visibility, A Conceptual Review [M]. AFGL-TR-79-0257, AD, A085451.
- [16] Hu Bao-xin, Li Xiao-wen, Zhu Chong-guang, A Atmospheric Correction Algorithm Based on BRDF-Loop [J]. *Remote Sensing of Environment in China*, 1996, **11**(2):151—159. [胡宝新, 李小文, 朱重光等, 一种大气订正的方法: BRDF 大气订正环, 环境遥感 [J], 1996, **11**(2):151—159]
- [17] Li Xiao-wen, Ni Wen-ge, Hu Bao-xin, Woodcock, C. Strahler A H. Decoupling path-scattering of light in a homogeneous layer and multiple bouncing at its non-Lambertian bottom [J]. *Science in China (Ser. E)*, 1996, **26**(5):457—466. [李小文, 倪文革等, 光在介质层中的路径散射及在下垫面的多次反弹 [J], 中国科学 (E), 1996, **26**(5):457—466.]
- [18] Li Xiao-wen, On Convergence of BRDF-based Atmospheric Correction Loop [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, **2**(1):10—12. [李小文, BRDF 大气影响订正环的收敛性研究 [J]. 遥感学报, 1998, **2**(1):10—12.]
- [19] He Li-ming, Li Xiao-wen *et al.* A Atmospheric Correction Algorithm for AMTIS Based on BRDF Loop and MODTRAN⁴. 1 [J]. submitted to *Journal of Remote Sensing, China*. [何立明, 李小文等, AMTIS 大气订正算法——基于 MODTRAN 和 BRDF 大气订正环, 投稿遥感学报.]

Analysis and Application for the Empirical Relative between Aerosol Optical Depth and Horizontal Meteorological Range

HE Li-ming¹, WANG Hua¹, YAN Guang-jian¹, LI Xiao-wen^{1,2}, ZHU Wen-jiao¹, WNAG Jin-di¹

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Dept. Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Center for Remote Sensing, Dept. of Geography, Boston University, USA)

Abstract: Aerosol optical depth, one of the important parameters to describe the property of aerosol, is widely used in the region of Radiative Transfer and Atmospheric Correction; but at the same time, Meteorological Range but not Aerosol Optical Depth is used as an input parameter for the famous Radiative Transfer program: MODTRAN. It is reasonable to get the relative between Aerosol Optical Depth and Meteorological Range for the convenient using of all kinds of aerosol data. Though there are many expressions to describe the relative between them, the analysis in this paper shows that their relative change with the season change of aerosol profiles. An empirical expression was given here based on the simulation using MODTRAN⁴, and the coefficient of formula is different with the seasonal change of aerosol profiles. If this difference is ignored, the error of aerosol optical depth error may reach the level of 0.029 when the same meteorological range is transformed.

Key words: meteorological range, aerosol optical depth, empirical expression