

基于 MODIS 数据的典型能见度条件下 大气透过率计算

钱峻屏^{1,2)} 黄菲³⁾

¹⁾(广州地理研究所广东省遥感与GIS重点实验室,广州 510070) ²⁾(中山大学地理科学与规划学院,广州 510275)

³⁾(中国海洋大学海洋环境学院海洋气象系,青岛 266003)

摘要 现有的辐射传输模型仅考虑气溶胶影响下的大气透过率,在能见度低于5km时,会给大气透过率计算带来较大的误差。本文综合考虑影响大气透过率的气溶胶和水汽因素,并利用中光谱分辨率MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)数据,在特征参数的空间及时间尺度变化均比较大时,对大气透过率进行了定量反演,并进一步建立了整层大气透过率与行星反照率的关系模型,为近地层大气能见度的遥感监测提供了方法。

关键词 MODIS 辐射传输方程 大气透过率 水汽 气溶胶

中图分类号: P435 TN216 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)04-0575-05

Calculation of Atmospheric Transmissibility of MODIS Data Under Different Levels of Meteorological Visibilities

QIAN Jun-ping^{1,2)}, HUANG Fei³⁾

¹⁾(Key Laboratory of GIS and Remote Sensing of Guangdong Province, Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070)

²⁾(School of Geography and Planning, SunYet-Sen University, Guangzhou 510275)

³⁾(Department of Marine Meteorology, OAC, Ocean University of China, Qingdao 266003)

Abstract In this article, 6S model was used to calculate the satellite observing reflectivity and radiability above ocean surface with typical oceanic aerosol parameters selected. The result shows that some obvious errors will be induced when visibility drops under 5km. Then a synthetic influence on radiation transmission of aerosol and vapor was considered in the radiation transmission model and equations between whole layer transmissibility and planet reflection was built. Three days of MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer) data corresponding to high visibility, moderate visibility and low visibility were taken for calculation. The result shows close accordance with the observed visibility of the time. This study gives an applicable methodology for transmissibility calculation under different atmosphere condition and provides a potential method for quantitative visibility motoring with remote sensing.

Keywords MODIS, radiation transmission model, atmospheric transmissibility, vapor, aerosol

1 引言

大气透过率是影响地表辐射收支平衡的重要物理量,也是遥感、大气物理和辐射传输研究的主要对象。对于晴空条件下的大气透过率计算,通常采用

地表气象参数结合实测遥感数据^[1-3],或通过辐射传输模型计算得到^[4,5]。前一种方法通常对成像条件较好,大气成分较为稳定的情况适用,通过暗像元法^[6]计算出整层大气的平均透过率;后一种方法以Modtran和6S模型为代表^[7,8],该方法受模型参数影响较大,本文通过计算认为模型计算在能见度低

基金项目:国家“863”青年基金项目(2002AA639500);广东省自然科学基金项目(032212);“985”工程项目(105203200400006)

收稿日期:2005-06-03;改回日期:2005-10-17

第一作者简介:钱峻屏(1972~),女,助理研究员。现为中山大学地理与规划学院博士研究生。主要研究领域为城市环境、环境遥感与GIS在资源环境分析中的应用。E-mail:qian@gdas.ac.cn

于 5km 时,会带来较大的误差。本文尝试综合考虑影响大气透过率的气溶胶和水汽因素,从辐射传输方程出发,对不同大气条件下的大气辐射消光特性进行分析,并利用 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 中光谱分辨率数据,选择特征谱段,对在水平及时间尺度特征参数变化均比较大时的大气透过率进行了定量反演,并进一步建立了整层大气透过率与行星反照率的关系模型,为近地层大气能见度的遥感监测提供了依据。

2 大气成分对行星反照率的影响

入射到大气层顶的太阳直接辐射能为

$$E_0 = \frac{I_0}{r^2} r_0^2 \quad (1)$$

其中, r_0 为日地平均距离, r 为卫星观测时的日地距离, $\frac{r^2}{r_0^2}$ 为地心距 (取值 0.9833), I_0 为太阳常数 (取定常值 $1.360 \times 10^3 \text{ W/m}^2$)。

2.1 气溶胶对行星反照率的影响

气溶胶主要集中在大气低层,随高度增加而减小,但是在平流层又出现一个极大值。由于对流层气溶胶的影响,地表太阳直射光经大气衰减,地表反射,进入到传感器的辐射亮度为

$$L = [T'E_0 \cos(\theta) + E_d] \frac{TR_g}{\pi} + L_p \quad (2)$$

其中, θ 为太阳天顶角, T' 为入射方向大气透过率, E_d 为地面接收到的天空光入射辐照度, T 为垂向上大气透过率,有 $T' = \frac{T}{\cos(\theta)}$, R_g 为地面反射率, L_p 为上行路径散射辐照度。

对于大气散射,有

$$L_p = \frac{E_0 \omega}{4\pi} P(\Theta) \quad (3)$$

其中, ω 为大气散射系数, $P(\Theta)$ 为散射相函数, Θ 为入射光方向与散射光方向之间的夹角,垂直观测下 $\Theta = \theta$ 。

在大气较为干燥的情况下,大气对辐射的影响主要为瑞利散射,且大气吸收的影响可忽略,此时有 $\omega = 1 - T$,即

$$E_d = \frac{\omega}{2} E_0 = \frac{1 - T}{2} E_0 \quad (4)$$

瑞利散射相函数 $P(\theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2(\theta))$ 。

因此,卫星接收到的地表行星反射率为

$$R = \frac{L\pi}{E_0 \cos(\theta)} = \left[T' \cos(\theta) + \frac{\omega}{2} \right] \frac{TR_g}{\cos(\theta)} + \frac{\omega}{4} P(\theta) \quad (5)$$

大气光学厚度 $\tau \approx \tau_m + \tau_a$, 此时,不考虑大气的吸收, $\tau \approx \omega$ 。 τ_m 为垂直方向上气体分子光学厚度,可作为常数,即 $\tau_m = 0.0082 \lambda^{-4}$ 。 τ_a 为垂直方向上气溶胶光学厚度, $\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha}$, α 为波长指数,取 $\alpha = 4.0$, β 为大气浑浊度,是影响大气透过率的主要因子。

利用上述公式,式(5)中的地表行星反射率表示为

$$R = \frac{L\pi}{E_0 \cos(\theta)} = T' TR_g + \frac{\omega}{2} \frac{TR_g}{\cos(\theta)} + \frac{\omega}{4} P(\theta) \quad (6)$$

式中,假设已知表面 R_g 为常数,通过卫星观测数据可得到 R, θ 。 $P(\theta)$ 仅考虑瑞利散射项, λ 为卫星各通道的中心波长,综合式(1)~(4),式(6)中仅 β 和 α 为变量,因此,利用 2 个以上波段即可求出整层大气浑浊度指数,进而得到整层大气消光系数。

2.2 水汽对行星反照率的影响

在太阳—地表—探测器的光程路径上,整个辐射传输过程都要受到大气中水汽吸收的影响,特别是当大气中水汽含量较高时,必须考虑水汽的吸收和反射特性。大气气体分子对辐射的吸收是由其光谱结构决定的,具有明显的波长选择特性,在近红外波段,方程式(6)中气溶胶的光学厚度相对非常小,气溶胶的散射影响可以忽略,在此情况下,气溶胶的单次散射和多次散射要比水汽的吸收小得多。因此,当气溶胶的浓度相对水汽浓度比较低的时候,可以将气溶胶等微小粒子引起的散射看作小量,或在各波段为定常值。

为了求得水汽的吸收,采用双波长差分吸收原理^[9]。设水汽的光学厚度为 τ_w , 根据比耳—朗伯定律,处于水汽吸收带的波长为 λ_w 的辐射通过大气后的透过率为

$$T(\lambda_w) = \frac{I(\lambda_w)}{I_0(\lambda_w)} = \exp(-\tau_w - \tau') \quad (7)$$

同理,对不被水汽线性吸收的辐射有

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-\tau'') \quad (8)$$

式中, I_0 和 I 分别为通过大气前后的辐射强度, τ' 和 τ'' 为其他吸收分子和气溶胶在这两个波段上的光学厚度。由于分子和气溶胶在这两个波长上的消光相差不大,因此可认为 $\tau' \approx \tau''$ 。

由此可解出水汽的透过率为

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda_w)}{I_0(\lambda)} = \exp(-\tau_w) \quad (9)$$

利用上式,在因水汽引起的低能见度情况下,计算整层水汽的透过率。

3 大气透过率计算

3.1 数据和通道选择

3.1.1 数据源

采用MODIS 36通道扫描辐射仪数据 Level 1B数据,波段覆盖范围是0.4~15.0 μm ,数据空间分辨率统一采用1km地表分辨率,MODIS数据在轨道位置、带宽、辐射度、灵敏度、光谱带宽、几何配准的精密度和定标的准确度与精密密度等技术条件上都达到较高水平,有助于水汽和气溶胶的精确求解。

3.1.2 波长选择

正确地选择反演通道,是气溶胶光学厚度反演和水汽吸收反演的关键。在实际应用中,气溶胶光学厚度的反演通常采用可见光2个波段,本文采用蓝光和红光波段;对于水汽反演,通常采用中心频率在0.935 μm 、0.940 μm 和0.905 μm 的水汽吸收通道,但对近红外区的探测研究认为^[10,11],0.7~1.0 μm 的水汽吸收较弱而气溶胶的消光又比较强,加上其他气体(CO₂)的吸收,对于本文研究的低能见度条件下的水汽透过率将产生较大的误差,因此,采用3.2~3.86 μm 波长,以减少气溶胶光学厚度的影响,增加对水汽的敏感性。

3.2 辐射纠正和反照率计算

从MODIS Level 1B数据(16-bit)的影像DN值计算得到行星辐射(反射)强度值公式如下(L单位为:W/m²/μm/sr)

$$L(orR) = corrected_counts_scale \times (DN - corrected_counts_offset) \quad (10)$$

MODIS 1B数据在提供前已经计算了校正比例corrected_counts_scale和校正偏移量corrected_counts_offset,并将其作为属性值提供在SDS(scientific datasets)科学数据集中,因此,直接从MODIS数据属性中计算出corrected_counts_scale和corrected_counts_offset,或从文件属性中读取,都可以做到对影像数据的基本辐射纠正,进而计算出传感器探测到的行星反射率和地表射出辐射。

3.3 大气透过率计算与结果分析

图1、图2是利用6S模型计算得到的不同能见

度条件下,卫星接收到的行星反照率光谱曲线(图1)与实际观测结果(图2)的比较。

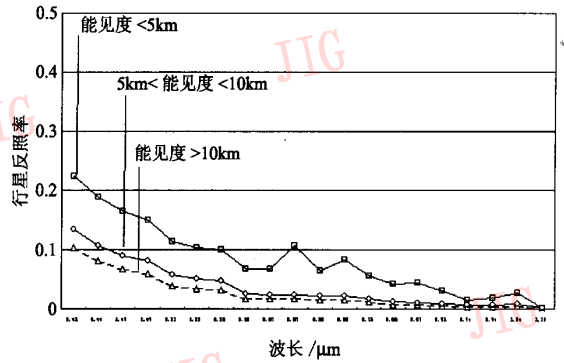


图1 6S模型中不同能见度下的行星反照率计算结果
Fig.1 Observed planet reflectivity from MODIS

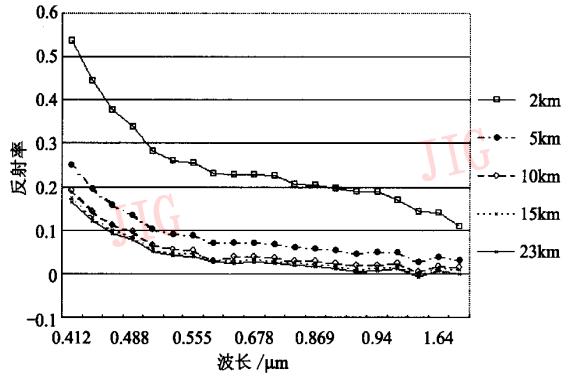


图2 MODIS行星反照率实测值
Fig.2 Planet reflectivity under different visibility-results of 6S model

度中,能见度在5km以下时,模型计算得到的行星反照率与图2中的实际观测结果误差较大,能见度低于5km时,水汽的吸收作用影响更大。

选取数据采集时刻为2004年1月8日、2月9日、2月29日,计算海洋表面的大气透过率。各日成像参数及当日大气能见度条件如表1所示。

表1 数据成像参数及当日大气能见度
Tab.1 Imaging parameters and atmospheric visibility of the date

时间	1月8日	2月9日	2月29日
传感器天顶角(°)	34.75	33.82	59.36
传感器方位角(°)	98.18	98.03	95.2
太阳天顶角h(°)	50.45	43.65	41.5
太阳方位角(°)	150.25	142.57	131.44
华南沿海平均能见度(km)	10	20	1

海洋表面的水体反射率主要受水体中悬浮泥沙和叶绿素含量的影响,随水体的混浊度和叶绿素浓度变化而变化。此外,镜面反射对海洋表面反射率的影响也不可忽略。假设外海海洋表面反射率稳定不变,接近天然清水反射率,在各波段取常数,则水体光谱曲线如图 3 所示。

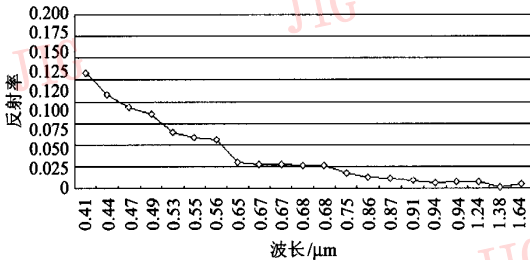


图 3 洁净海水反射率曲线

Fig. 3 Reflectivity of clean seawater over study area

气溶胶散射透过率计算选择 MODIS ch8 通道 (0.405 ~ 0.420 μm), 该波段处于蓝光波段, 水汽、CO₂ 和 O_{2,3} 的吸收最弱, 散射率最强; 水汽透过率计算选择 ch27 通道 (6.535 ~ 6.895 μm) 水汽强吸收通道和 ch31 通道 (10.780 ~ 11.280 μm) 水汽透过通道。选择 3 个典型能见度天气, 计算得到整层大气透过率结果如图版 I 图 1 所示。

反演结果中, 整层大气透过率与当日能见度实测情况有较好的对应关系。2004 年 2 月 9 日高能能见度条件下, 影响能见度的主要因子是大气分子和气溶胶, 当日整层大气透过率均较高 (大于 0.7, 华南沿海大于 0.8), 且透过率空间变化小、空间分布均一, 说明高能能见度条件下, 气溶胶的水平混合较强; 2004 年 1 月 8 日, 能见度在 10km 左右, 华南沿海受云影响, 部分海域透过率反演结果为空 (无数据), 但华南沿海无云遮挡地区, 采用气溶胶通道计算得到的大气整层透过率在 0.6 ~ 0.9 之间, 且大气整层透过率的空间变化较大, 气溶胶空间分布不均匀, 从沿岸向近海出现多条等值线分布; 2004 年 2 月 29 日, 华南沿海观测站及海上船只观测到的能见度进一步降低, 此时利用可见光通道计算得到的整层大气透过率为负值, 而利用水汽通道计算得到的大气透过率在图中均较低, 其中, 龙鼓水道和蒲台岛附近整层大气透过率在 0.3 ~ 0.4 (实测能见度在 4.5km 以下), 东、西博察水道整层大气透过率更低, 在 0.1 ~ 0.2 (实测能见度在 2km 以下), 而台湾海峡以西部分地区, 在可见光通道观察到的大气透

过率较高, 计算得到的大气透过率也略高, 在 0.4 ~ 0.5 之间。

4 结 论

通过计算结果与实测结果比较认为, 仅考虑气溶胶影响的辐射传输模型, 在能见度低于 5km 时, 会带来较大的误差。在此基础上, 本文综合考虑影响大气透过率的气溶胶和水汽因素, 从辐射传输方程出发, 对不同大气条件下的大气辐射消光特性进行分析, 推导了水汽和气溶胶影响下的大气透过率计算方程, 并对推导结果进行了分析验证, 得到以下初步结果:

(1) 气溶胶散射透过率计算选择 MODIS ch8 通道 (0.405 ~ 0.420 μm), 该波段处于蓝光波段, 水汽、CO₂ 和 O_{2,3} 的吸收最弱, 散射率最强的; 水汽透过率计算选择 ch27 通道 (6.535 ~ 6.895 μm) 水汽强吸收通道和 ch31 通道 (10.780 ~ 11.280 μm) 水汽透过通道反演能见度, 实验结果证明所选通道受其他因素影响较小, 并且对气溶胶和水汽变化较为敏感。

(2) 选择台湾海峡及华南沿海的典型能见度天气条件, 利用中光谱分辨率 MODIS 数据, 及所选特征谱段, 对大气透过率进行了定量反演, 反演结果与地面实际观测数据较为一致, 反映模型代表性较好。

(3) 利用以上整层大气透过率与行星反照率的关系模型, 为近地层水平大气能见度的遥感监测提供了方法。

致 谢 在此, 特别感谢中山大学地理科学与规划学院邓孺孺教授在本论文成文阶段所给予的宝贵意见。

参 考 文 献 (References)

- 1 Kambezidis H D, DjepaPetrova V, Adamopoulos A D. Radiative transfer. 1. Atmospheric transmission monitoring with modeling and ground-based multispectral measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27): 6976 ~ 6982.
- 2 Wu Xiao. Calculation of earth atmospheric transmissivity and radiance [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1998, 9(1): 124 ~ 128. [吴晓. 地球大气透过率及辐射率计算 [J]. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 124 ~ 128.]
- 3 Wang Wei-min, Zhou Zu-gang, Li Hai-min. A study on effect of the atmospheric environment to Noaa channel transmission value [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2004, 24(3): 285 ~ 293. [王伟民, 周

- 祖刚,李海民等. 大气对 NOAA 通道辐射透过率的影响研究[J]. 气象科学, 2004, 24(3): 285 ~ 293.]
- 4 Sun Yi-yi, Li Zhi-ping, Yang Bo. High resolution radiative transfer model FASCOD2[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1997, 14(1): 75 ~ 80. [孙毅义,李治平,杨波. 高分辨率大气传输模型 FASCOD2[J]. 量子电子学报, 1997, 14(1): 75 ~ 80.]
- 5 Gao B C, Kaufman Y J. Water vapor retrievals using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels [J]. Journal of Geophysical Research—Atmospheres, 2003, 108(D13): 4389.
- 6 Xu Qing-shan, Wei He-li, Zhao Feng-sheng. Retrieval of reflectance along coastal zone with seaWiFS[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(3): 352 ~ 356. [徐青山,魏合理,赵凤生. 利用 Sea WiFS 数据反演海岸地物光谱反射率[J]. 遥感学报, 2002, 6(3): 352 ~ 356.]
- 7 NASA, MODIS Level 1B Product User's Guide For Level 1B Version 4.2.0(Terra) and Version 4.2.1(Aqua) [EB/OL]. http://www.mest.ssaibiz/L1B/L1B_docs/V4_LATEST_L1B_DOCUMENTS/L1B_Product_Users_Guide.doc, 2003-12-03.
- 8 Liu Yu-jie, Yang Zhong-dong, et al. MODIS Remote Sensing Information Processing Theory and Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2001. [刘玉洁,杨忠东等著. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 114 ~ 165.]
- 9 Chen Hong-bin, Wu Bei-ying, Zhang Wen-xing, et al. A study of determining precipitable water from solar infrared transmission [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1996, 20(5): 627 ~ 632. [陈洪滨,吴北英,章文星等. 从红外太阳透过率反演大气可降水量的研究[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 627 ~ 632.]
- 10 Song Zeng-fang, Wei He-li, Wu Xiao-qing. Infrared remote sensing of atmospheric water vapour [J]. Remote Sensing of Environment China, 1996, 11(2): 130 ~ 137. [宋正方,魏合理,吴晓庆. 大气水汽的红外遥感[J]. 环境遥感, 1996, 11(2): 130 ~ 137.]
- 11 Liu Lin-hua, Dong Shi-kui, Yu Qi-zheng. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval 0.1 μm from infrared 1 to 14 μm , (II) transmittance of water vapor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(6): 75 ~ 78. [刘林华,董士奎,余其铮. 红外 1 ~ 14 μm 波长间隔 0.1 μm 上大气平均透过率 (II) 水蒸汽的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(6): 75 ~ 78.]

更正

2005 年第 10 卷第 12 期由李光鑫、王珂、张立保撰写的“加权多分辨率图像融合的快速算法”一文中的部分文献索引标注有误,现更正如下:

1532 页第 3.1 节中“Piella^[6]提出的……”更正为“Piella^[9]提出的……”;

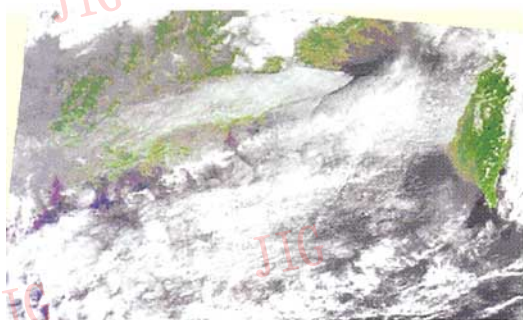
1534 页图 6 图题中“(a)文献[7]方法……”更正为“(a)文献[10]方法……”,“(b)文献[8]方法……”更正为“(b)文献[11]方法……”;

1535 页表 3,表 4 中所有的“文献[7]方法”更正为“文献[10]方法”,所有的“文献[8]方法”更正为“文献[11]方法”,所有的“文献[9]方法”更正为“文献[5]方法”;

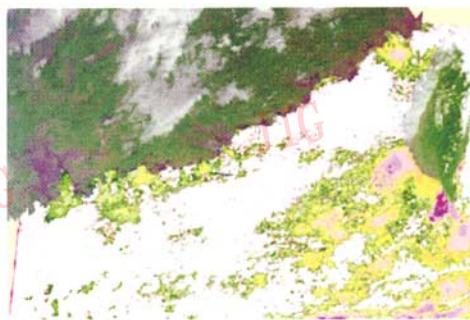
1535 页第 3.3 节的“(2)本文方法能够……”一段中所有的“文献[9]方法”更正为“文献[5]方法”;

1535 页表 5 中“文献[9]方法”更正为“文献[5]方法”。

《中国图象图形学报》编辑部

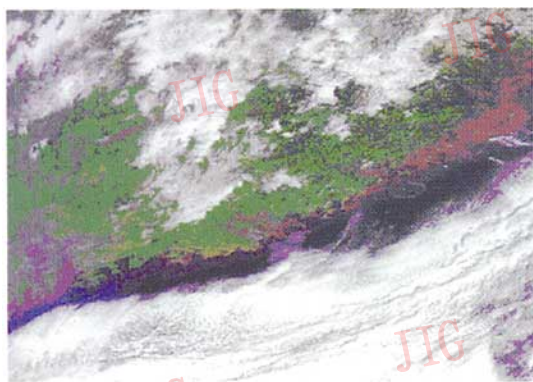


MODIS影像(r:6,g:2,b:1)
当日华南沿海气象能见度: 1 0 k m

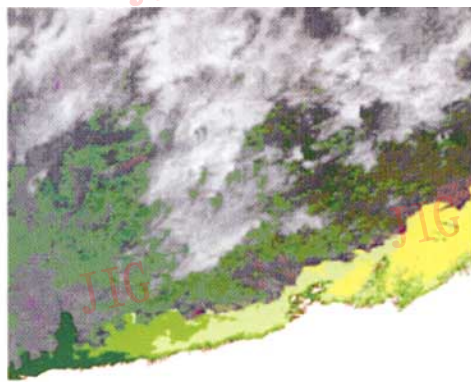


2004年1月8日大气透过率反演结果

(a) 2004年1月8日

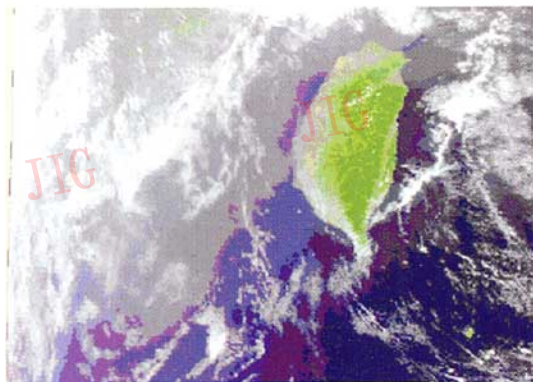


MODIS影像(r:6,g:2,b:1)
当日华南沿海气象能见度: 1.3 ~ 2.5 k m



2004年2月9日大气透过率反演结果

(b) 2004年2月9日



MODIS影像(r:6,g:2,b:1)
当日华南沿海气象能见度: 1 ~ 5 k m



2004年2月29日大气透过率反演结果

(c) 2004年2月29日

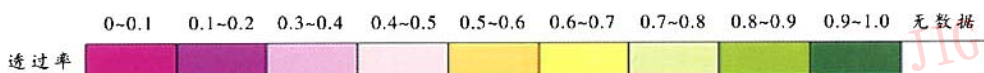


图1 典型能见度条件下的大气透过率反演结果

Fig.1 Calculation results of atmospheric transmissibility under typical visibility conditions