中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 9 期: 1289 ~ 1301
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

基于大气矢量辐射传输的近红外遥感用雅克比矩阵计算

白文广, 张鹏*, 张文建, 李俊, 马刚, 漆成莉, 刘辉

国家卫星气象中心, 北京 100081
* 通讯作者, E-mail: zhangp@cma.gov.cn

收稿日期: 2019-10-22; 收修改稿日期: 2020-01-29; 接受日期: 2020-02-12; 网络版发表日期: 2020-04-30
国家重点研发计划项目(编号: 2018YFB0504900、2018YFB0504905)、国家自然科学基金项目(批准号: 41975034)和公益性行业(气象)科研专项项目(编号: GYHY201506002、GYHY201506022)资助

摘要 考虑到地表反射和大气粒子散射的偏振影响, 基于近红外卫星观测的高精度大气参数反演需要精确的大气矢量辐射传输模拟. 而国内面向遥感用途的辐射传输计算研究较少, 反演算法多依赖于国外模型. 文章基于物理累加原理, 构建了基于近似无限小薄层大气透射、反射以及太阳散射累加计算的近红外波段矢量辐射传输计算模型. 该模型在单层分子瑞利散射、单层气溶胶散射、多层瑞利散射以及真实大气多层分子吸收、瑞利散射以及气溶胶散射共存典型场景下与国际矢量模型基准值有非常好的一致性, 计算精度可以达到千分之几量级. 为满足实际遥感应用需求, 进一步基于该模型累加计算过程, 发展了基于微分法的主要大气、地表参数雅克比矩阵解析计算方法, 并与精确的扰动计算结果进行了对比验证. 结果显示: 该解析法计算得到的二氧化碳浓度雅克比矩阵精度可以达到千分之几量级, 气溶胶光学厚度雅克比矩阵计算精度优于1.0×10^{-3}%. 该方法地表反照率雅克比矩阵计算简单, 计算精度优于2.03×10^{-4}%, 满足实际观测数据反演精度需求. 文章构建的自主辐射传输计算模型, 有望用于国内外近红外高光谱温室气体仪器数据模拟和反演.

关键词 气溶胶散射, 矢量辐射传输, 雅克比矩阵计算

1 引言

太阳入射以及地气系统发射的电磁辐射经地表反射、大气吸收或散射后包含有大量的大气参数、地表特性信息. 通过对特定波段的观测, 可以用于大气气体浓度垂直分布、温度、湿度廓线、云以及地表参数信息的反演(Liou, 2002; 石广玉, 2007; 董超华等, 2013). 大气顶太阳入射辐射为自然光, 经大气分子、气溶胶、云粒子散射或者地表反射后表现为部分偏振光. 在中长波红外遥感中, 该偏振效应很弱, 忽略后可以得到很好的近似. 而利用近红外或波长更短波段进行大气遥感中, 忽略偏振效应可能会引入较大的反演误差(Stam等, 1999; Natraj等, 2007; 白文广等, 2018). 另有研究表明短波偏振辐射观测可以提供大气

中文引用格式: 白文广, 张鹏, 张文建, 李俊, 马刚, 漆成莉, 刘辉. 2020. 基于大气矢量辐射传输的近红外遥感用雅克比矩阵计算. 中国科学: 地球科学, 50: 1289–1301, doi: 10.1360/SSTe-2019-0254
英文引用格式: Bai W, Zhang P, Zhang W, Li J, Ma G, Qi C, Liu H. 2020. Jacobian matrix for near-infrared remote sensing based on vector radiative transfer model. Science China Earth Sciences, 63: 1353–1365, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9586-7

© 2020 《中国科学》杂志社

遥感的额外信息，可以用于对流层臭氧、卷云、气溶胶以及地表特性等信息提取(段民征和吕达仁，2008; Jiang等，2004; Hasekamp等，2002; Levy等，2004; Mishchenko和Travis，1997; Takano和Liou，1995). 卫星观测的近红外1.6μm波段能量主要来自大气后向散射和地表反射辐射，是比较纯净的二氧化碳弱吸收带，已被广泛用于卫星二氧化碳遥感研究(Kuang等，2002; Boesche等，2009; Buchwitz等，2013; 王鼎益和刘东东，2018). 国内外有关近红外二氧化碳反演研究中，通常采用最优估计的方法(Rodgers，2000)，该方法通过对目标参数的非线性迭代实现辐射传输模拟与真实观测的拟合得到大气中二氧化碳含量. 鉴于地表反射、大气粒子散射的偏振效应，迭代过程中需要求解矢量辐射传输方程(Natraj等，2007; 白文广等，2018)，精确模拟给定大气状态下的卫星观测辐射. 同时需要给出模拟观测辐射对目标参数向量(如二氧化碳浓度、气溶胶光学厚度等)的一阶导数(雅克比矩阵)，以限定迭代参数的方向和量值大小(Boesche等，2009; Buchwitz等，2013).

考虑地表反射、大气粒子散射偏振效应的矢量辐射传输计算(特别是雅克比矩阵的计算)相比标量辐射传输方程求解，更为繁琐复杂. 国外学者已经发展了多种精确矢量大气辐射传输计算模型，如基于离散坐标的SCIATRAN(Rozanov等，2014)、VLIDORT(Spurr，2006)、VDISORT(Weng，1992)等模型. Lenoble等(2007)发展的基于逐次散射法的矢量辐射模型. Evans和Stephens(1991)利用累加原理开发的PolRadTran辐射传输计算模型，以及基于蒙特卡罗的MYSTIC、SPARTA(Emde等，2015)等模型都实现了矢量辐射传输方程的高精度求解. 其中VDISORT、VLIDORT以及SCIATRAN在辐射量计算的基础上基于离散坐标方程的解析形式，实现了大气参数的雅克比矩阵高效计算，验证结果有较高的精度，已用于大气参数反演研究(Rozanov等，2014; Spurr，2006; Weng和Liu，2003). 相比基于离散坐标的微分辐射传输方程数理求解，逐次散射法和累加法通过模拟散射或反射过程进行辐射传输计算，物理过程比较直观，计算结果非常稳定(de Haan等，1987; Evans和Stephens，1991; 高扬等，2010; Bai等，2018). 而国际上基于逐次散射或者累加法等物理算法实现大气参数雅克比矩阵计算的辐射传输模型并不多见. 国内学者在标量大气辐射传输计算方面有许多研究，比如张鹏等开发了基于逐次散射方法的大气辐射传输模型，并已用于气溶胶遥感研究(Zhang，2001). 石广玉(1998)、张华和石广玉(2000)、Zhang等(2018)发展的用于气候研究的辐射计算模型. 白文广等(2017)基于累加法发展的短波红外辐射传输模型等. 在卫星遥感用途的矢量辐射传输研究方面，Duan等(2010)基于逐次散射计算发展的SOSVRT模型具有较高的计算精度和效率. 但国内这些辐射传输计算研究主要集中在辐射量模拟，而针对大气参数反演需要的辐射量雅克比矩阵计算研究较少，限制了模型在卫星数据遥感反演中的实际应用. 目前，国内各研究机构发展的相关反演算法，主要有依赖于国外辐射传输模型.

国际上雅可比矩阵计算的方法主要有线性解析法、微分数值解析法和有限元扰动法三种. 其中线性解析法需要基于辐射传输方程求解方程，构建大气顶辐射量对目标参数的线性解析形式. 该方法具有较高的计算精度和效率，但困难在于线性解析形式的获得(Li等，2017; Rozanov等，2014; Spurr，2006). 微分数值解析法基于辐射传输求解的数值计算过程，利用微分计算的链式规则，获得大气顶辐射量对目标大气、地表等参数数值微分计算结果. 此方法实施过程简单，具有较高的精度，但需要计算中间过程参量的数值微分，计算效率受到一定限制(Chen等，2010). 有限元扰动法，通过对目标参数的微量扰动，比较扰动前后大气顶辐射量的改变，直接计算大气顶辐射量对目标参数的一阶导数. 此方法具有非常高的计算精度，常用于其他雅可比计算方法的检验，但该方法需要多次求解辐射传输计算方程，计算效率较低(Weng和Liu，2003).

随着中国碳卫星(Yang等，2018; Liu等，2018)以及搭载有温室气体载荷风云三D卫星的发射，为满足近红外波段二氧化碳等大气参数反演的需求，急需开展耦合有主要地气参数雅克比矩阵计算的矢量辐射传输模型研究. 本研究在先前发展的标量辐射传输模型的基础上(白文广等，2017)，将累加法原理扩展到矢量辐射传输计算，建立近红外波段的高光谱矢量辐射传输计算模型，并根据累加计算过程，采用微分法实现辐射量对大气浓度、地表反照率等主要参数雅克比矩阵解析计算. 通过典型场景下与国际矢量辐射计算基准值比较验证本文模型的精度，并与自身精确扰动计算结果比较验证该模型雅克比矩阵计算精度.

2　累加法矢量辐射传输以及主要参数雅克比矩阵计算

2.1　考虑偏振的辐射传输方程

忽略地气热辐射作用，考虑偏振的单色平面平行大气辐射传输方程表示为(Liou, 2002; Spurr, 2006; 石广玉, 2007; Duan等, 2010)

$$\mu\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}(\tau;\mu,\varphi)}{\mathrm{d}\tau}=-\mathbf{I}(\tau;\mu,\varphi)+\frac{\tilde{\omega}(\tau)}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1}\mathbf{M}(\tau;\mu,\varphi;\mu',\varphi')\mathbf{I}(\tau;\mu',\varphi')\mathrm{d}\mu'\mathrm{d}\varphi'+\frac{\tilde{\omega}(\tau)}{4\pi}\mathbf{M}(\tau;\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)F_s\exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right)\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix},\tag{1}$$

式中，矢量$\mathbf{I}$表示4个斯托克斯参数$[I,Q,U,V]^{\mathrm{T}}$，I、Q、U、V分别为辐射强度、线偏振方向、线偏振强度和圆偏振分量；$\tilde{\omega}$为单次散射反照率；τ为光学厚度；μ为天顶角余弦，向下为正；φ表示方位角；μ_0、φ_0分别为太阳入射天顶角余弦以及方位角；F_s为大气顶太阳辐射度；$\mathbf{M}$为4×4散射矩阵(穆勒矩阵Mueller Matrix)，可由相对于入射光束与散射光束散射平面的相矩阵$\mathbf{P}(\cos\Theta)$旋转变换得到

$$\mathbf{M}(\mu,\varphi;\mu',\varphi')=\mathbf{L}(\pi-\sigma_2)\times\mathbf{P}(\cos\Theta)\mathbf{L}(-\sigma_1),\tag{2}$$

σ_1、σ_2分别为入射平面、出射平面与散射平面夹角；Θ为散射角；$\mathbf{L}$表示旋转矩阵，表示为旋转角χ的矩阵函数:

$$\mathbf{L}(\chi)=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&\cos2\chi&\sin2\chi&0\\0&-\sin2\chi&\cos2\chi&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}.\tag{3}$$

本文只考虑单个均质球粒子或镜面对称的随机取向粒子群，$\mathbf{P}(\cos\Theta)$可以表示为

$$\mathbf{P}(\Theta)=\begin{bmatrix}a_1(\Theta)&b_1(\Theta)&0&0\\b_1(\Theta)&a_2(\Theta)&0&0\\0&0&a_3(\Theta)&b_2(\Theta)\\0&0&-b_2(\Theta)&a_4(\Theta)\end{bmatrix}.\tag{4}$$

辐射传输方程(1)求解通常采用傅里叶展开的方式，将辐射强度、散射相矩阵展开为方位角级数求和表示为(Weng和Liu, 2003; Spurr, 2006; Duan等, 2010):

$$\mathbf{I}(\tau;\mu,\varphi)=\sum_{m=0}^{M}\mathbf{I}_m^{\mathrm{c}}(\tau;\mu)\times\cos[m(\varphi_0-\varphi')]+\mathbf{I}_m^{\mathrm{s}}(\tau;\mu)\sin[m(\varphi_0-\varphi')],\tag{5}$$

$$\mathbf{M}(\mu,\varphi;\mu',\varphi')=1/2\mathbf{C}_0+\sum_{m=1}^{M}\{\mathbf{C}_m(\mu,\mu')\cos[m(\varphi'-\varphi)]+\mathbf{S}_m(\mu,\mu')\sin[m(\varphi'-\varphi)]\},\tag{6}$$

式中，m为展开级数，$\mathbf{C}_m$、$\mathbf{S}_m$为傅里叶展开系数，$\mathbf{I}_m^{\mathrm{s}}$、$\mathbf{I}_m^{\mathrm{c}}$分别表示正、余弦分量(上标c表示余弦展开系数，s表示正弦展开系数)．式(5)、(6)带入式(1)得到m阶展开方程为

$$\mu\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}_m(\tau;\mu)}{\mathrm{d}\tau}=-\mathbf{I}_m(\tau;\mu)+\frac{\tilde{\omega}(\tau)}{4}(1+\delta_{0,m})\int_{-1}^{1}\mathbf{M}_m(\tau;\mu,\mu')\mathbf{I}_m(\tau;\mu,\mu')\mathrm{d}\mu'+\frac{\tilde{\omega}(\tau)}{4\pi}\mathbf{M}_m(\tau;\mu,\mu_0)F_s\exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right)\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix},\tag{7}$$

$$\mathbf{M}_m=\begin{bmatrix}M_{11,m}^{\mathrm{c}}&M_{12,m}^{\mathrm{c}}&M_{13,m}^{\mathrm{s}}&M_{14,m}^{\mathrm{s}}\\M_{21,m}^{\mathrm{c}}&M_{22,m}^{\mathrm{c}}&M_{23,m}^{\mathrm{s}}&M_{24,m}^{\mathrm{s}}\\-M_{31,m}^{\mathrm{s}}&-M_{32,m}^{\mathrm{s}}&M_{33,m}^{\mathrm{c}}&M_{34,m}^{\mathrm{c}}\\-M_{41,m}^{\mathrm{s}}&-M_{42,m}^{\mathrm{s}}&M_{43,m}^{\mathrm{c}}&M_{44,m}^{\mathrm{c}}\end{bmatrix}=\frac{1}{(1+\delta_{0,m})}\begin{bmatrix}C_{11,m}&C_{12,m}&S_{13,m}&S_{14,m}\\C_{21,m}&C_{22,m}&S_{23,m}&S_{24,m}\\-S_{31,m}&-S_{32,m}&C_{33,m}&C_{34,m}\\-S_{41,m}&-S_{42,m}&C_{43,m}&C_{44,m}\end{bmatrix},\tag{8}$$

I、Q正弦项为零，U、V余弦项为零，辐射强度矢量表示为$\mathbf{I}_m=[I_m^{\mathrm{c}},Q_m^{\mathrm{c}},U_m^{\mathrm{s}},V_m^{\mathrm{s}}]^{\mathrm{T}}$(Evans和Stephens, 1991; Weng和Liu, 2003; Duan等, 2010)．散射相矩阵$\mathbf{M}_m$系数可以采用直接快速傅里叶展开的方式进行计算，但计算速度相对较慢，本文采用球谐函数系数展开的方法计算得到(de Haan等, 1987; Duan等, 2010)．

2.2　累加法求解矢量辐射传输方程

累加法求解矢量辐射传输方程的原理与求解标量辐射传输方程相同，即两气层透射、反射特性的叠加

可以得到两个气层合成层的透射、反射特性. 详见(Evans和Stephens, 1991; 白文广等, 2017).

2.2.1 层矢量透射、反射函数计算

考虑无限小薄层, 忽略多次散射, 薄层反射矩阵$\mathbf{r}_{\text{ini}}$和透射矩阵$\mathbf{t}_{\text{ini}}$各元素分别记为(Evans和Stephens, 1991):

$$t^{\pm}_{iji'j',\text{ini}}=\delta_{ii'}\delta_{jj'}-\frac{\Delta\tau}{\mu_j}\times\left(\delta_{ii'}\delta_{jj'}-\tilde{\omega}\frac{1+\delta_{0,m}}{4}w_{j'}M_{m,ii'}\left(\pm\mu_j,\pm\mu_{j'}\right)\right),\tag{9}$$

$$r^{\pm}_{iji'j',\text{ini}}=\frac{\Delta\tau}{\mu_j}\tilde{\omega}\frac{1+\delta_{0,m}}{4}w_{j'}M_{m,ii'}\left(\pm\mu_j,\mp\mu_{j'}\right),\tag{10}$$

式中, 上标正、负号表示向下和向上, $\tilde{\omega}$表示层单次散射反照率, $\Delta\tau$表示薄层光学厚度值, w_j表示高斯积分节点权重. 与标量辐射传输计算相似, 第k层大气分层, 假设光学厚度为δ, 将其划分为2^n个近似薄层($\delta=2^n\Delta\tau$), 每个薄层具有相同的光学厚度. 根据累加法计算原理, 该层大气的反射和透射函数可以通过两层(下标1、2表示)的逐次累加得到(Evans和Stephens, 1991):

$$\mathbf{r}_T^+=\mathbf{r}_2^++\mathbf{t}_2^+\boldsymbol{\Gamma}^+\mathbf{r}_1^+\mathbf{t}_2^-,\tag{11}$$

$$\mathbf{t}_T^+=\mathbf{t}_2^+\boldsymbol{\Gamma}^+\mathbf{t}_1^+,\tag{12}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^+=\left(1-\mathbf{r}_1^+\mathbf{r}_2^-\right)^{-1},\tag{13}$$

$$\mathbf{r}_T^-=\mathbf{r}_1^-+\mathbf{t}_1^-\boldsymbol{\Gamma}^-\mathbf{r}_2^-\mathbf{t}_1^+,\tag{14}$$

$$\mathbf{t}_T^-=\mathbf{t}_1^-\boldsymbol{\Gamma}^-\mathbf{t}_2^-,\tag{15}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^-=\left(1-\mathbf{r}_2^-\mathbf{r}_1^+\right)^{-1}.\tag{16}$$

通过n次累加, 可以得到该层的总反射、透射矩阵$\mathbf{r}_T^{\pm}$、$\mathbf{t}_T^{\pm}$, 为方便表示记为$\mathbf{r}^{\pm}(k)$、$\mathbf{t}^{\pm}(k)$.

2.2.2 层矢量源函数辐射累加计算

对无限小薄层$\Delta\tau$, 太阳散射辐射源函数项$\mathbf{S}_{\text{ini}}$各元素为

$$S^{\pm}_{ij,\text{ini}}=\frac{\Delta\tau}{\mu_j}\frac{\tilde{\omega}}{4\pi\mu_0}\exp(-\tau/\mu_0)M_{m,i}\left(\pm\mu_j,\mu_0\right),\tag{17}$$

τ为大气顶到该层的光学厚度, μ_0表示太阳天顶角. 该层大气向下、向上的太阳散射源函数可以通过以下公式逐次累加计算得到(Evans和Stephens, 1991):

$$\mathbf{S}^+_{T,\text{solar}}=\mathbf{S}^+_{2,\text{solar}}exp_fac+\mathbf{T}_2^+\boldsymbol{\Gamma}^+\left(\mathbf{S}^+_{1,\text{solar}}+\mathbf{R}_1^+\mathbf{S}^-_{2,\text{solar}}exp_fac\right),\tag{18}$$

$$\mathbf{S}^-_{T,\text{solar}}=\mathbf{S}^-_{1,\text{solar}}+\mathbf{T}_1^-\boldsymbol{\Gamma}^-\left(\mathbf{S}^-_{2,\text{solar}}exp_fac+\mathbf{R}_2^-\mathbf{S}^+_{1,\text{solar}}\right),\tag{19}$$

式中, $exp_fac=\exp\left(-\Delta\tau 2^{i-1}/\mu_0\right)$, i表示第i次累加. 通过n次叠加后得到该层太阳散射向下、向上源函数项$\mathbf{S}^+_{T,\text{solar}}$、$\mathbf{S}^-_{T,\text{solar}}$, 为方便表示记为$\mathbf{S}^+_{\text{solar}}(k)$、$\mathbf{S}^-_{\text{solar}}(k)$.

2.2.3 地表处理与大气累加计算

累加得到各大气分层的辐射特性基础上, 地表可以看做无透射辐射层处理. 对于朗伯体地表, 反射各向同性, 无偏振, 地表反照率可以记为ε, 地表反射矩阵$\mathbf{R}_g$各元素为

$$R^-_{g,1j1j'}=2.0\varepsilon(\mu_{j'}w_{j'}).\tag{20}$$

地表反射率矩阵中其他元素以及透射率矩阵均为0. 地表反射太阳辐射可以表示为

$$\mathbf{S}^-_{g,\text{solar}}=\varepsilon F_s\exp\left(-\frac{\tau^*}{\mu_0}\right)/\pi\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix},\tag{21}$$

式中, τ^*是总光学厚度值. 根据累加法计算原理, 整层大气向上的辐射可以从地表到大气层顶依次累加计算得到:

$$\mathbf{R}^-(k+1)=\mathbf{R}^-(k)+\mathbf{T}^-(k)[\mathbf{E}-\mathbf{r}^-(k)\mathbf{R}^+(k)]^{-1}\mathbf{r}^-(k)\mathbf{T}^+(k),\tag{22}$$

$$\mathbf{R}^+(k+1)=\mathbf{r}^+(k)+\mathbf{t}^+(k)[\mathbf{E}-\mathbf{R}^+(k)\mathbf{r}^-(k)]^{-1}\mathbf{R}^+(k)\mathbf{t}^-(k),\tag{23}$$

$$\mathbf{T}^-(k+1)=\mathbf{T}^-(k)[\mathbf{E}-\mathbf{r}^-(k)\mathbf{R}^+(k)]^{-1}\mathbf{t}^-(k),\tag{24}$$

$$\mathbf{T}^+(k+1)=\mathbf{t}^+(k)[\mathbf{E}-\mathbf{R}^+(k)\mathbf{r}^-(k)]^{-1}\mathbf{T}^+(k),\tag{25}$$

$$\mathbf{I}^-(k+1)=\mathbf{I}^-(k)+\mathbf{T}^-(k)[\mathbf{E}-\mathbf{r}^-(k)\mathbf{R}^+(k)]^{-1}\mathbf{r}^-(k)\mathbf{I}^+(k)+\mathbf{T}^-(k)[\mathbf{E}-\mathbf{r}^-(k)\mathbf{R}^+(k)]^{-1}\mathbf{S}^-_{\text{solar}}(k),\tag{26}$$

$$\mathbf{I}^+(k+1)=\mathbf{S}^+_{\text{solar}}(k)+\mathbf{t}^+(k)[\mathbf{E}-\mathbf{R}^+(k)\mathbf{r}^-(k)]^{-1}\mathbf{R}^+(k)\mathbf{S}^-_{\text{solar}}(k)+\mathbf{t}^+(k)[\mathbf{E}-\mathbf{R}^+(k)\mathbf{r}^-(k)]^{-1}\mathbf{I}^+(k),\tag{27}$$

式中，$k=0$代表大气顶层，$k=n$代表地表层；$\mathbf{T}^{\pm}(k)$、$\mathbf{R}^{\pm}(k)$是大气层顶到第k层大气的透射、反射矩阵；$\mathbf{I}^{+}(k)$、$\mathbf{I}^{-}(k)$表示第k层大气的向下、向上辐射.

2.3　大气、地表参数雅克比矩阵计算

本研究采用微分数值解析混合有限元扰动的方法进行大气、地表参数雅可比矩阵计算, 根据2.2.1~2.2.3累加辐射量计算过程，地表反照率雅克比矩阵计算表示为

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}^{-}(n)}{\mathrm{d}\varepsilon}=\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{S}^{-}_{g,\mathrm{solar}}}\frac{\partial\mathbf{S}^{-}_{g,\mathrm{solar}}}{\partial\varepsilon}+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{R}_g}\frac{\partial\mathbf{R}_g}{\partial\varepsilon}. \tag{28}$$

光学厚度雅克比矩阵可以表示为

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\tau(k)}=&\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{R}(k)}\left[\frac{\partial\mathbf{R}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{R}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\tau(k)}\right]\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{T}(k)}\left[\frac{\partial\mathbf{T}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{T}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\tau(k)}\right]\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{I}(k)}\frac{\partial\mathbf{I}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{I}(k)}\frac{\partial\mathbf{I}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\tau(k)}\\
&+\sum_{m=k}^{n}\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(m)}\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(m)}{\partial\tau(k)}\\
=&\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{R}(k)}\left[\frac{\partial\mathbf{R}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{r}_{ini}}\frac{\partial\mathbf{r}_{ini}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\right.\\
&\left.+\frac{\partial\mathbf{R}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\right]\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{T}(k)}\left[\frac{\partial\mathbf{T}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\right.\\
&\left.+\frac{\partial\mathbf{T}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\right]\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{I}(k)}\frac{\partial\mathbf{I}(k)}{\partial\mathbf{r}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{r}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{I}(k)}\frac{\partial\mathbf{I}(k)}{\partial\mathbf{t}(k)}\left(\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{t}(k)}{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}\right)\\
&+\sum_{m=k}^{n}\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(m)}\left(\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(k)}{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(k)}{\partial\mathbf{t}_{ini}}\frac{\partial\mathbf{t}_{ini}}{\partial\tau(k)}\right.\\
&\left.+\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(k)}{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{ini}}}\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}+\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(k)}{\partial exp_fac.}\frac{\partial exp_fac}{\partial\tau(k)}\right),
\end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{X}(k)}=&\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{R}(k+1)}\frac{\partial\mathbf{R}(k+1)}{\partial\mathbf{X}(k)}\\
&+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{T}(k+1)}\frac{\partial\mathbf{T}(k+1)}{\partial\mathbf{X}(k)}+\frac{\partial\mathbf{I}^{-}(n)}{\partial\mathbf{I}(k+1)}\frac{\partial\mathbf{I}(k+1)}{\partial\mathbf{X}(k)},
\end{aligned} \tag{30}$$

式(30)中$\mathbf{X}$表示$\mathbf{I}(k)$、$\mathbf{R}(k)$、$\mathbf{T}(k)$、$\mathbf{r}(k)$、$\mathbf{t}(k)$或$\mathbf{S}_{\mathrm{solar}}(k)$. 其中$\frac{\partial\mathbf{t}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}$、$\frac{\partial\mathbf{r}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}$和$\frac{\partial\mathbf{S}_{\mathrm{ini}}}{\partial\tau(k)}$计算过程简单，计算量较小, 文中采用扰动法计算得到, 其他项采用数值微分(Bücker等, 2005; Jean等, 2008)算法计算得到. 通过式(28)~(30)逐层迭代，可以得到大气顶辐射对地表反照率、大气各层分子吸收、气溶胶以及分子瑞利散光学厚度的一阶导数(雅克比矩阵)，进一步通过偏分链式法则易得吸收气体浓度等雅克比矩阵(Spurr, 2006).

3　基于累加法的矢量辐射传输模型精度验证

3.1　大气顶辐射计算精度检验

基于以上2.2.1~2.2.3节数学物理原理, 建立包含大气吸收、分子和气溶胶散射的矢量辐射传输计算模型. 模型以近红外1.6μm波段为例，主要考虑二氧化碳、水汽等吸收作用，并利用逐线积分模型得到它们的吸收光学厚度廓线(Shephard等, 2009). 大气分子瑞利散射消光截面根据Bates方法计算得到(Rozanov等, 2014). 气溶胶消光、散射截面以及散射相矩阵展开系数采用德国不莱梅大学SCIATRAN中的WMO气溶胶模型(Rozanov等, 2014)，并假设大气气溶胶消光系数廓线随压强呈高斯分布, 根据整层光学厚度值缩放. 如图1为本模型计算得到的大气顶辐射量，已卷积到OCO-2光谱分辨率0.08nm(光谱响应函数假设为高斯函数). 地气系统辐射中, 圆偏振分量V可以忽略，下文不再考虑. 大气廓线采用美国标准廓线，地表气压为950hPa，地表反照率设置为0.3，气溶胶类型假设为大陆型, 光学厚度值设为0.3(550nm波长处), 廓线峰值在0.9atm，高斯分布尺度参数为0.03atm. 观测天顶角为5°, 太阳天顶角为45°, 相对方位角为180°. 为验证本模型模拟精度，计算单层分子瑞利散射、单层气溶胶散射、多层分子瑞利散射以及多层分子吸收、瑞利散射、气溶胶散射共存四种场景下(图2~5)的辐射量与国际上经过严格验证的MYSTIC模型模拟基准值进行比较(Emde等, 2015).

如图2为单层分子瑞利散射场景计算结果比较. 瑞利散射退极化因子假设为0.03, 层光学厚度0.5, 不考虑分子吸收作用. 太阳天顶角假设为45°, 方位角为0°, 观测天顶角0°~80°、方位角0°~360°以5°为间隔选择. 高

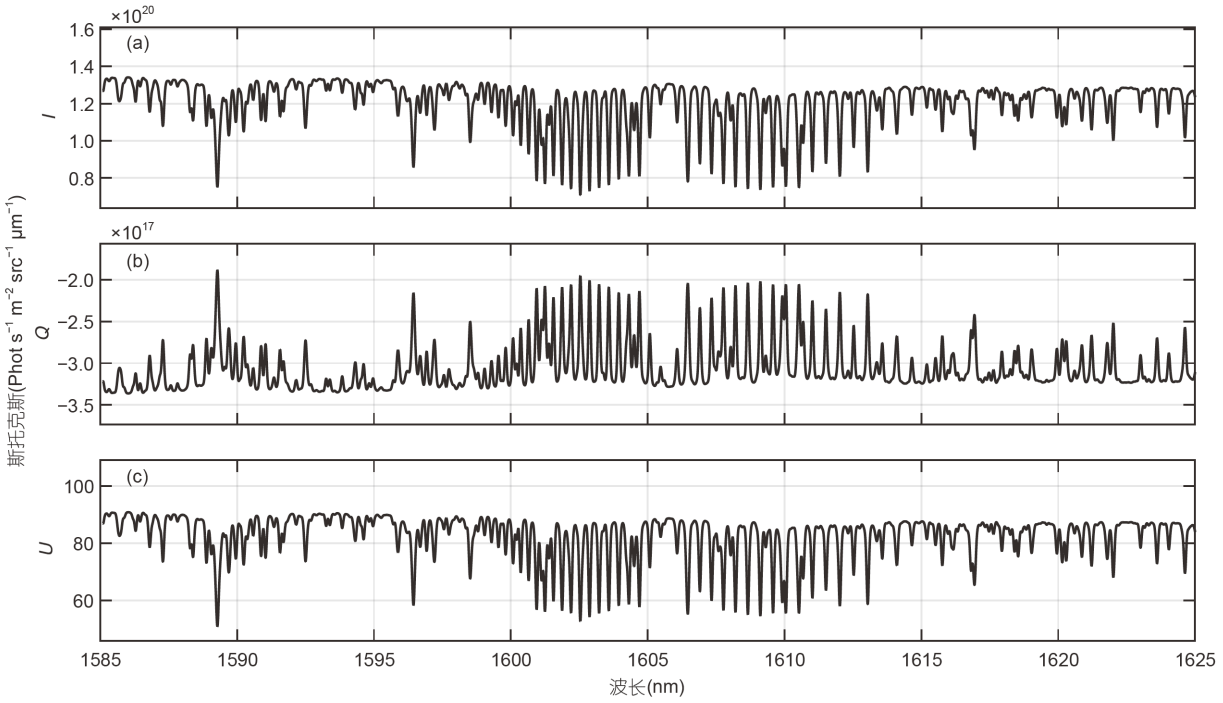


图 1　近红外1.6μm大气顶偏振辐射量计算

斯积分半球流数设置为16. 图2中第一排分别为本文模型计算得到的层顶斯托克斯I、Q、U辐射反射率; 第二排为对应斯托克斯反射率参数与MYSTIC模型计算结果差异的绝对值; 第三排为对应MYSTIC模型I、Q、U项反射率计算结果标准差的两倍. 图中极坐标角度表示观测方位角, 半径表示观测天顶角. 比较结果可见, 本文模型与MYSTIC模型结果差异随观测角度变化随机分布, 量值基本上控制在MYSTIC模型两倍标准差(2σ)以内, 且该绝对偏差远小于辐射反射率量值(相差约3个量级), 本文模型与MYSTIC模型计算基准值表现了非常好的一致性精度.

如图3为单层气溶胶散射场景下模拟结果比较. 气溶胶光学厚度假设为0.2, 散射相函数由长短轴比为3, 负折射指数为$1.52-0.01i$服从正态指数分布椭圆粒子群得到, 详见文献(Emde等, 2015). 太阳天顶角为40°, 方位角假设为0°, 不考虑地表反射作用. 高斯积分半球流数设置为60, 球谐函数展开项数为240(采用delta-M方法进行了截断近似). 图3表示与图2类似, 图中可见, 气溶胶极化程度要远小于瑞利散射条件, 模型在该气溶胶散射条件下计算结果与MYSTIC基准值绝对偏差基本在2σ以内, 该误差值大小分布基本与观测角度大小无关, 且远小于计算辐射量值(相差约2~3个量级). 比较结果表明本模型在气溶胶强方向性散射计算中也具有较高的精度.

以上两场景为简单的单层散射计算, 无需考虑2.2.3节中层间累加过程, 相对简单. 为验证模型在真实大气中计算精度, 需要考虑多层散射叠加作用. 如图4为考虑30层分子瑞利散射场景下模拟结果比较. 假设为美国标准大气廓线, 忽略大气吸收以及地表反射作用, 只考虑分子瑞利散射, 瑞利散射退极化因子假设为0.03, 瑞利散射光学厚度廓线详见文献(Emde等, 2015). 太阳天顶角假设60°, 方位角设置为0°. 高斯积分半球流数设置为16. 图4表示与图2、3相同, 图中可见, 与单层瑞利散射场景相似, 本文模型与MYSTIC基准值有非常高的一致性; 两个模型间斯托克斯参量反射率值绝对偏差远小于对应反射率值, 基本在MYSTIC模型计算结果2σ以内, 且偏差值大小与观测角度变化基本无关. 说明本模型在多层散射计算中也具有较高的计算精度.

真实大气辐射传输计算, 需要同时考虑大气吸收、瑞利散射、气溶胶散射作用. 如图5为考虑30层分子吸收、瑞利散射、气溶胶散射共存真实场景下模

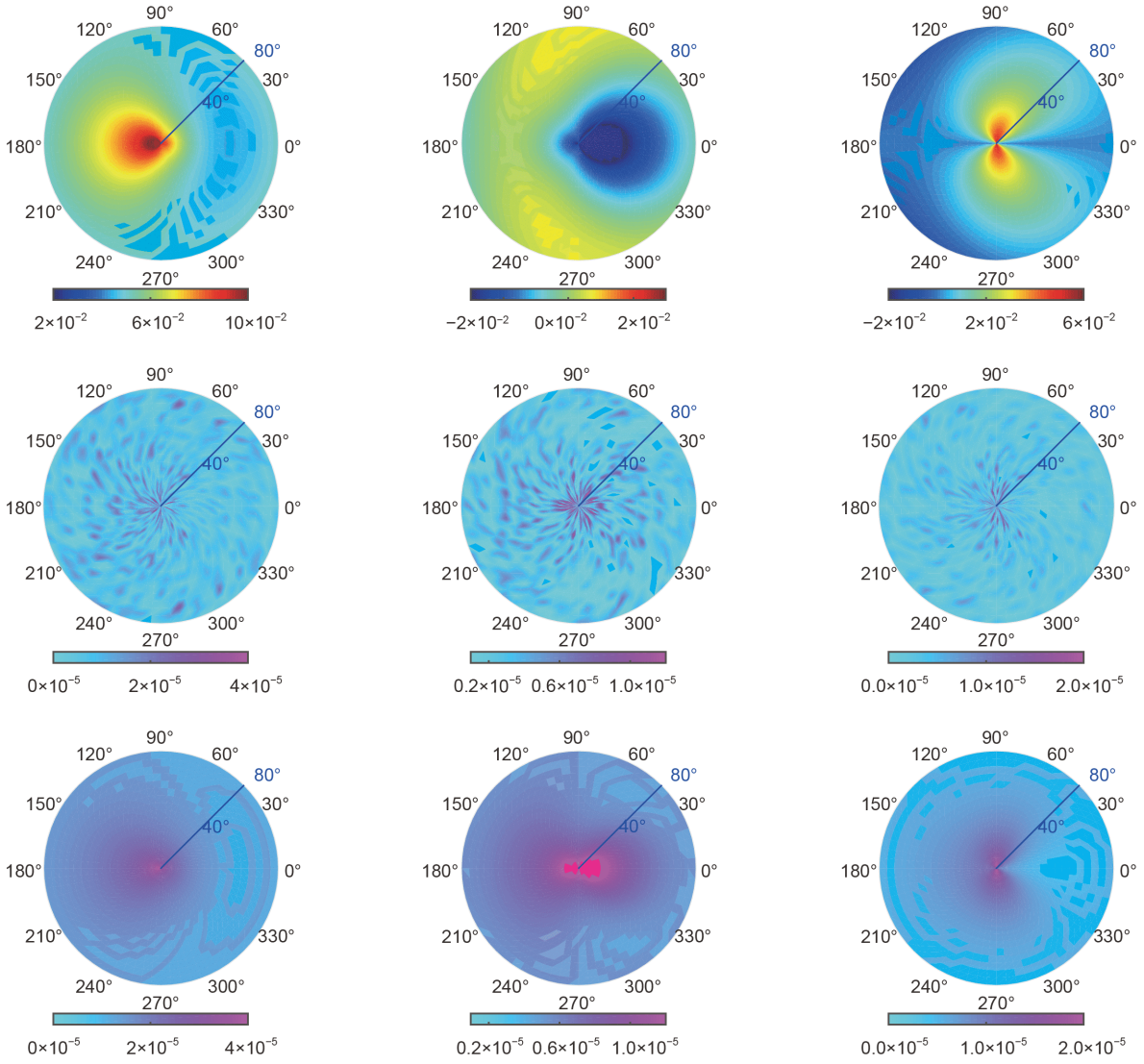


图 2　单层分子瑞利散射层顶反射率比较

第一排从左至右为本文模型计算的层顶斯托克斯I、Q、U辐射反射率, 第二排为对应斯托克斯反射率与MYSTIC计算结果差异的绝对值, 第三排为对应MYSTIC模型斯托克斯反射率计算结果标准差的两倍. 极坐标角度表示观测方位角, 半径表示观测天顶角

拟结果比较. 假设为美国标准大气廓线, 分子吸收以及气溶胶光学厚度廓线详见文献(Emde等, 2015). 分子瑞利散射退极化因子假设为0.03, 瑞利散射光学厚度廓线假设与以上多层分子瑞利散射场景相同; 气溶胶总光学厚度设置为0.2, 气溶胶散射特性参考文献(Emde等, 2015). 太阳天顶角假设为60°, 方位角设置为0°. 高斯积分半球流数设置为60, 球谐函数展开项数为240(采用delta-M方法进行了截断近似). 图5表示与图2~4相同. 图中比较结果显示, 大部分观测角度条件, 本模型计算结果与MYSTIC模型基准值由有非常高的一致性, 基本在MYSTIC模型计算结果2σ以内; Q、U反射率分量偏差在个别大观测天顶角下相对偏大, I反射率分量偏差在个别观测方位角条件下偏大, 可能与本模型采用的散射相函数展开项数以及高斯积分流数相对较少, 不能完全描述气溶胶散射的强方向特性有关. 但最大偏差值远小于对应斯托克斯向量反射率计算结果(相差2~3个量级), 有较高的计算精度.

通过以上典型场景下本文模型计算结果与MYSTIC模型基准值结果比较, 可见本文模型计算结果与基准值有很好的一致性, 计算精度可以达到千分之几

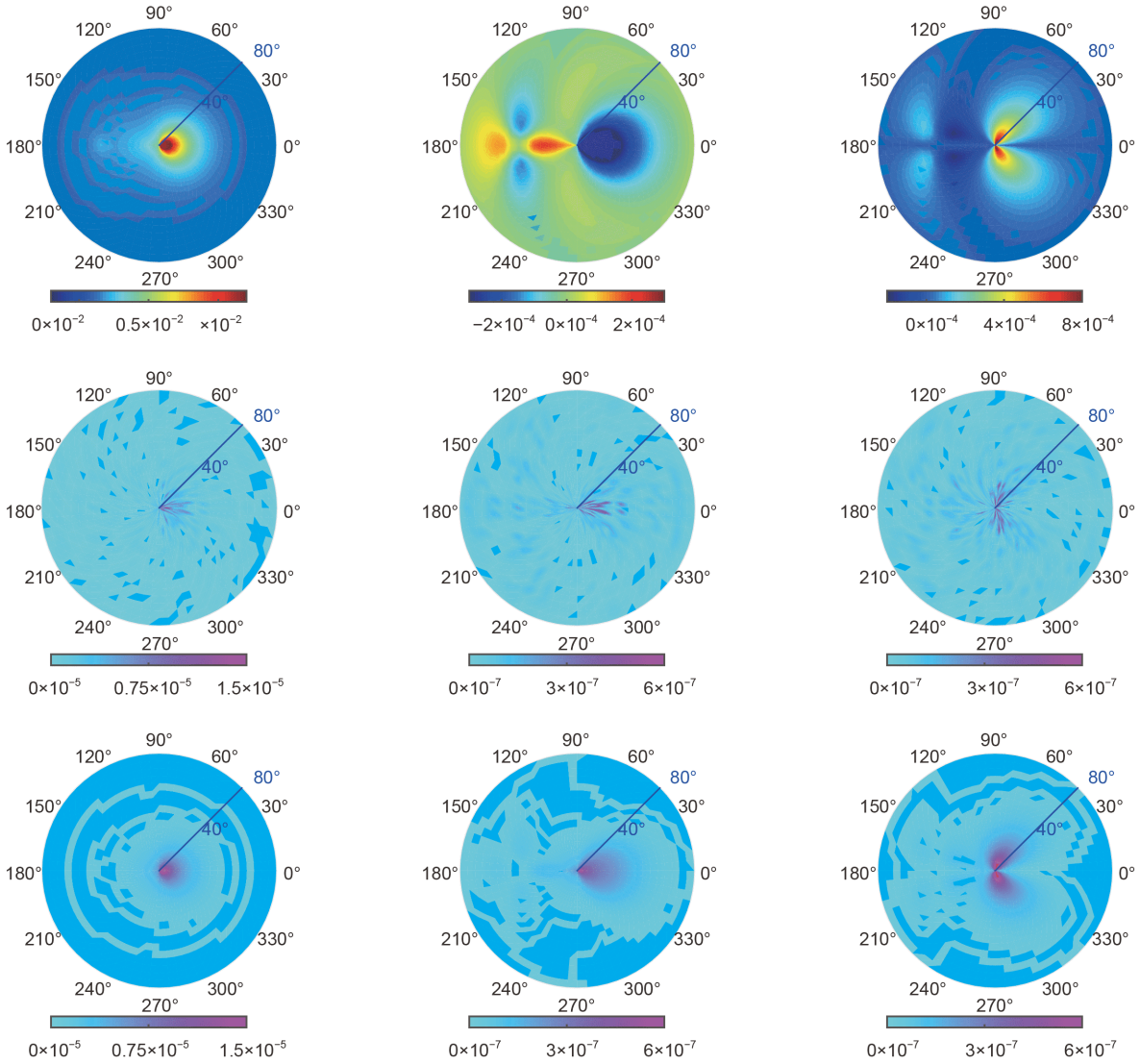


图 3　单层气溶胶散射层顶反射率比较

图例表示与图2相同

的量级(*I*分量相对偏差小于1.7‰，*Q*分量相对偏差小于9.5‰，*U*分量相对偏差小于6.2‰)，该精度与目前国际上发展的不同矢量辐射传输模型的计算精度基本相当(Emde等, 2015).

3.2　主要地气参数雅克比矩阵计算精度检验

基于2.3节微分计算原理，根据累加过程解析计算得到大气、地表参量雅克比矩阵. 为验证计算精度, 以大陆型气溶胶场景为例(图1场景)，与模型自身精确的扰动法计算结果进行比较. 图6~8分别为二氧化碳含量、气溶胶光学厚度、地表反照率雅克比矩阵比较结果. 实际测试中发现包含解析法雅克比矩阵计算的耗时约为只进行辐射传输计算的4~5倍. 但因扰动法需要根据目标参量扰动进行多次辐射传输方程求解，计算效率相对较低. 解析法雅克比矩阵计算效率远优于有限元扰动法，具体与扰动层数有关. 如对30层大气分层，同等条件下本文解析法雅克比计算速度约为有限元扰动法的20倍.

图6a和6b黑色线分别表示解析法计算得到的大气顶辐射量*I*对二氧化碳第20层(压强约942.67hPa)和10

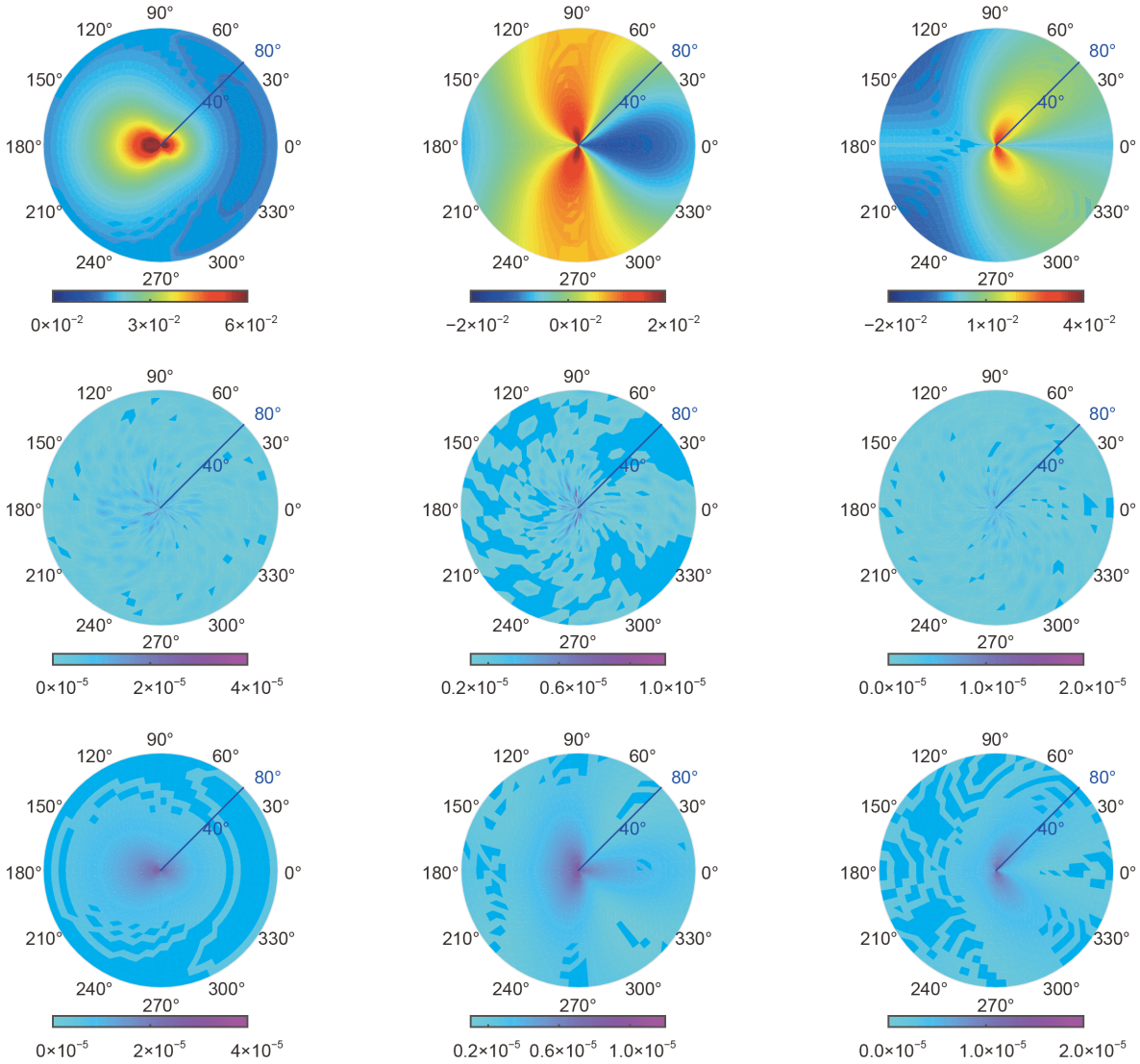


图 4　多层分子瑞利散射层顶反射率比较

图例表示与图2相同

层(压强约278.23hPa)含量的一阶导数计算结果，红色线表示相应解析法与扰动法结果的相对偏差；图6c和6d黑色线分别表示解析法计算得到的大气顶辐射量Q对二氧化碳第20层和10层含量的一阶导数计算结果，红色线表示相应解析法与扰动法结果的相对偏差；图6e和6f黑色线分别表示解析法计算得到的大气顶辐射量U对二氧化碳第20层和10层含量的一阶导数计算结果，红色线表示相应解析法与扰动法结果的相对偏差. 验证结果显示, 除个别通道外, 本文解析法与扰动法计算得到的I、Q、U分量雅克比相对偏差小于0.1%，具有非常好的一致性，满足实际观测数据反演精度需求. 图7为大气顶辐射I、Q、U分量对气溶胶光学厚度雅克比矩阵比较，除图7b、7d、7f为第15层(压强约695.07hPa)气溶胶含量雅克比比较外，其他表示与图6相似. 图中可见解析法计算得到的气溶胶光学厚度雅克比与扰动法有很好的一致性，I、Q、U分量雅克比相对偏差小于1.0×10^{-3}%, 反演中该误差完全可以忽略. 图8a和8b分别为大气顶辐射I、Q分量对地表反照率雅克比矩阵计算比较(朗伯体地表，U分量地表反照率雅克比值为0, 不再进行比较), 黑线为解析法计算得

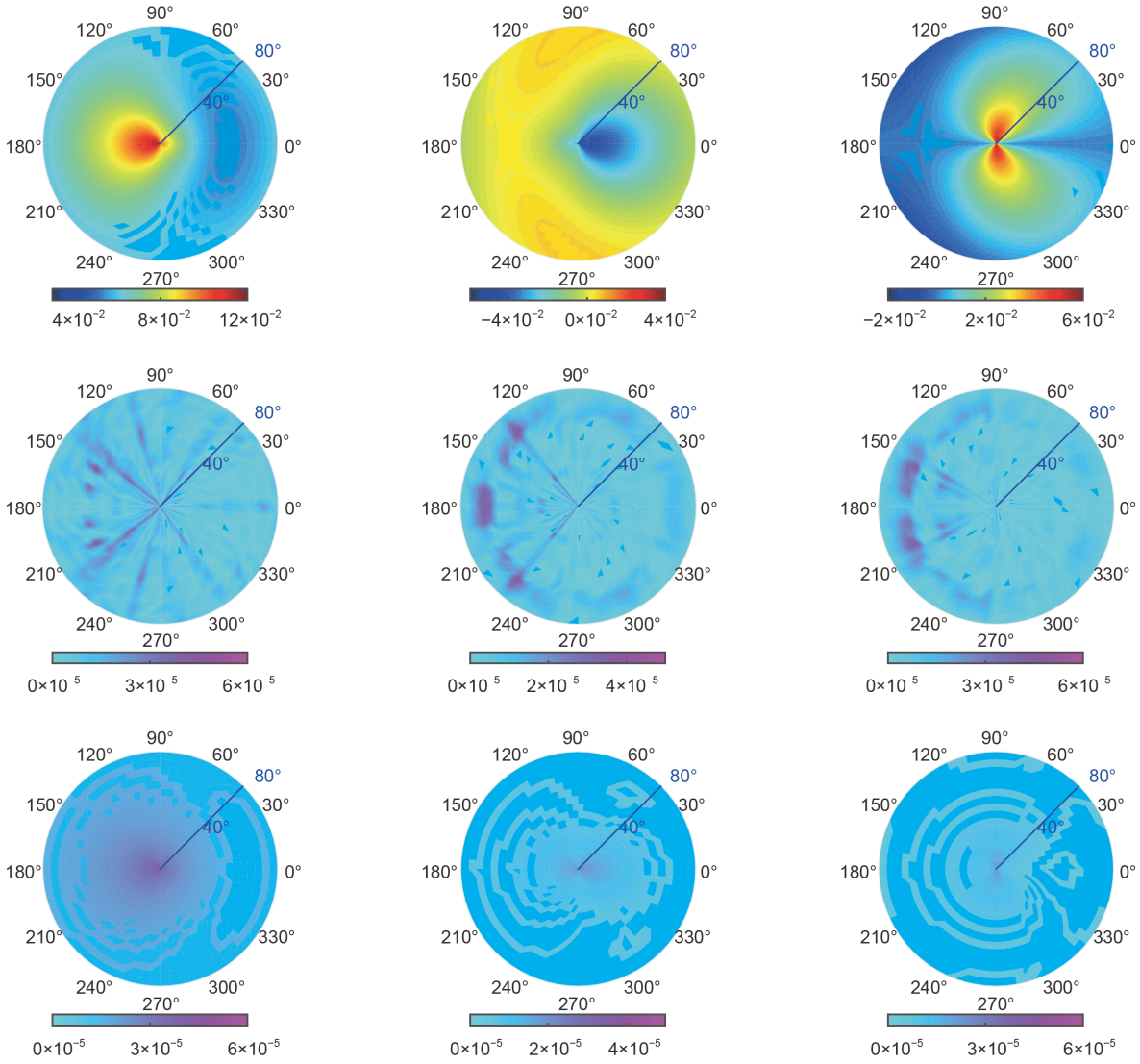


图 5　多层分子吸收、瑞利散射、气溶胶散射共存条件下层顶反射率比较

图例表示与图2相同

到的结果，红线为解析法与扰动法计算结果的相对偏差. 由式(28)可见, 解析法计算地表反照率雅克比矩阵非常直观简单，可以实现非常高的精度. 验证结果显示，I、Q分量对地表反照率雅克比矩阵计算精度优于2.03×10^{-4}%, 该误差在数据反演中完全可以忽略.

4　结论

近红外波段高精度偏振辐射传输模拟对该波段辐射特性研究以及实际卫星观测数据处理具有重要意义. 本研究在作者发展的短波红外标量辐射传输模型的基础上，将累加法原理进一步扩展到矢量辐射传输的计算中，考虑了有限薄层条件下太阳直射反射、多次散射等基本因素的近似计算，构建了近红外矢量大气辐射传输计算模型. 为验证模型计算精度，比较了单层分子瑞利散射、单层气溶胶散射、多层分子瑞利散射以及真实大气多层分子吸收、瑞利散射、气溶胶散射共存场景下大气顶反射率计算结果与国际矢量模型计算基准值差异，结果显示本文模型计算结果与基准值有很好的一致性，计算精度可以达到千分之几量级，与目前国际上发展的不同矢量辐射计算模型的精度基本相当.

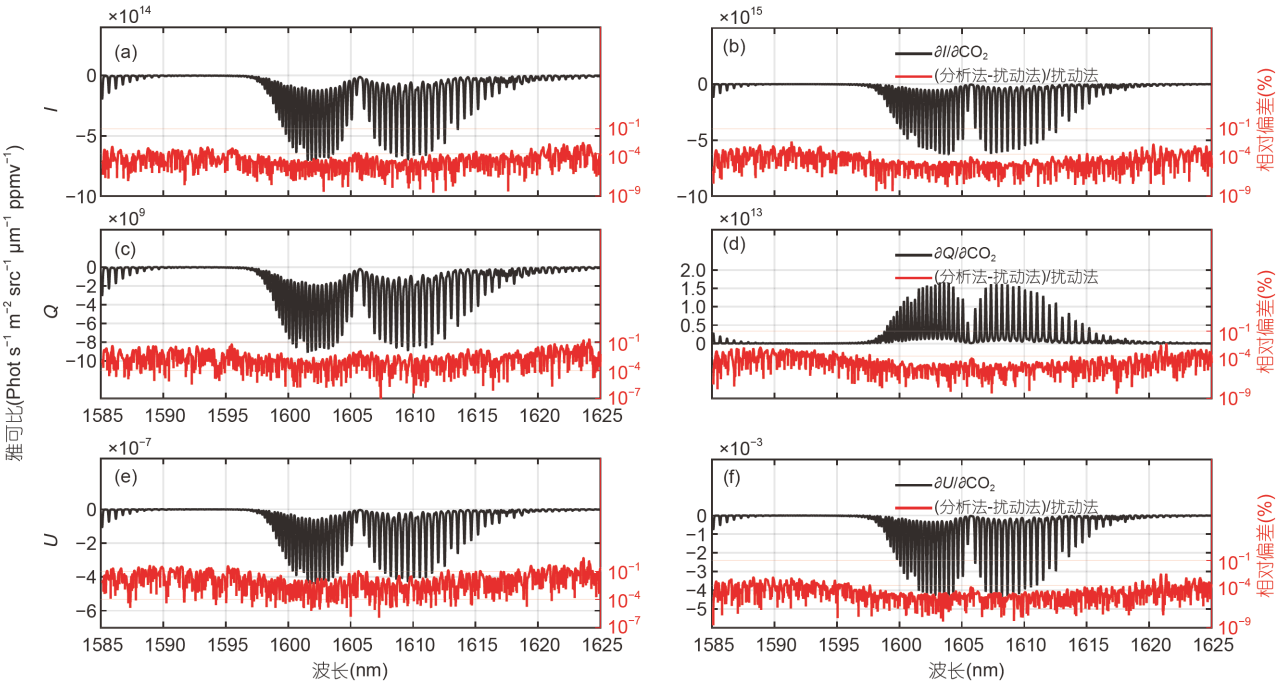


图 6　二氧化碳浓度雅克比计算精度验证

1 ppmv = 10^{-6}

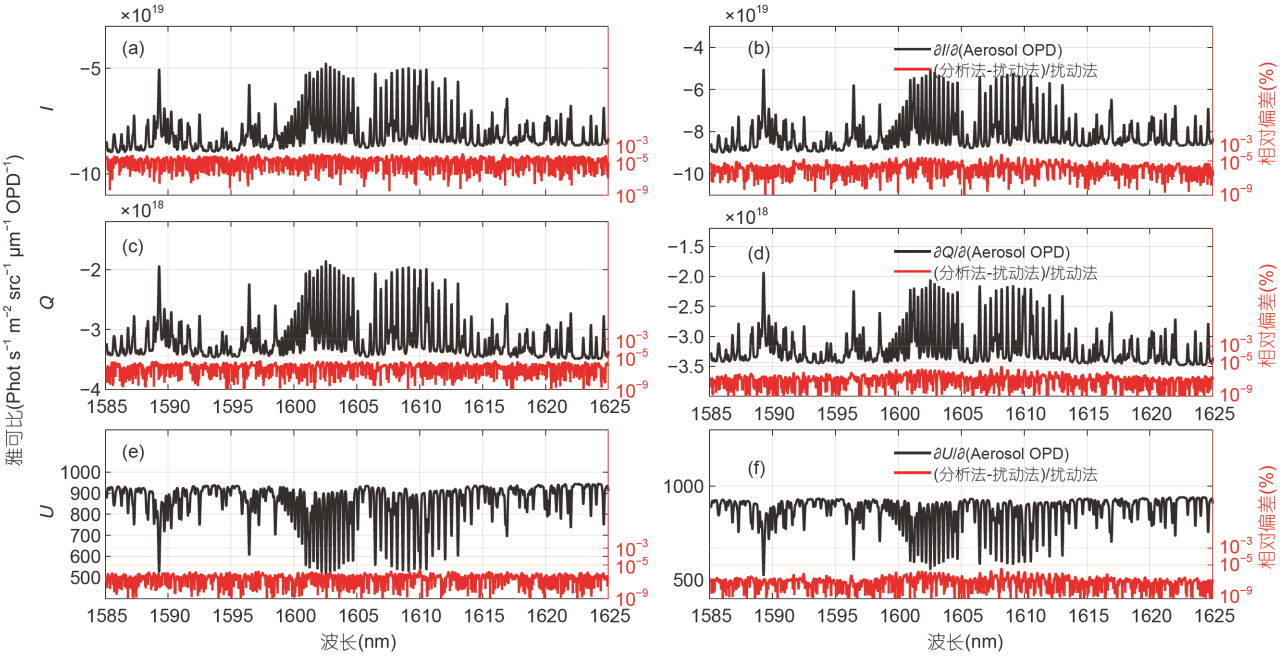


图 7　气溶胶光学厚度雅克比计算精度验证

实际卫星高光谱数据反演中往往还需要模拟辐射量对目标观测参数的一阶导数雅克比矩阵. 根据累加法计算过程, 建立了基于微分法的大气成分浓度、气溶胶光学厚度、地表反照率等主要参数的雅克比矩阵解析计算模型. 通过与精确扰动法计算结果比较验证显示, 该解析方法能够高效得到二氧化碳浓度、气溶

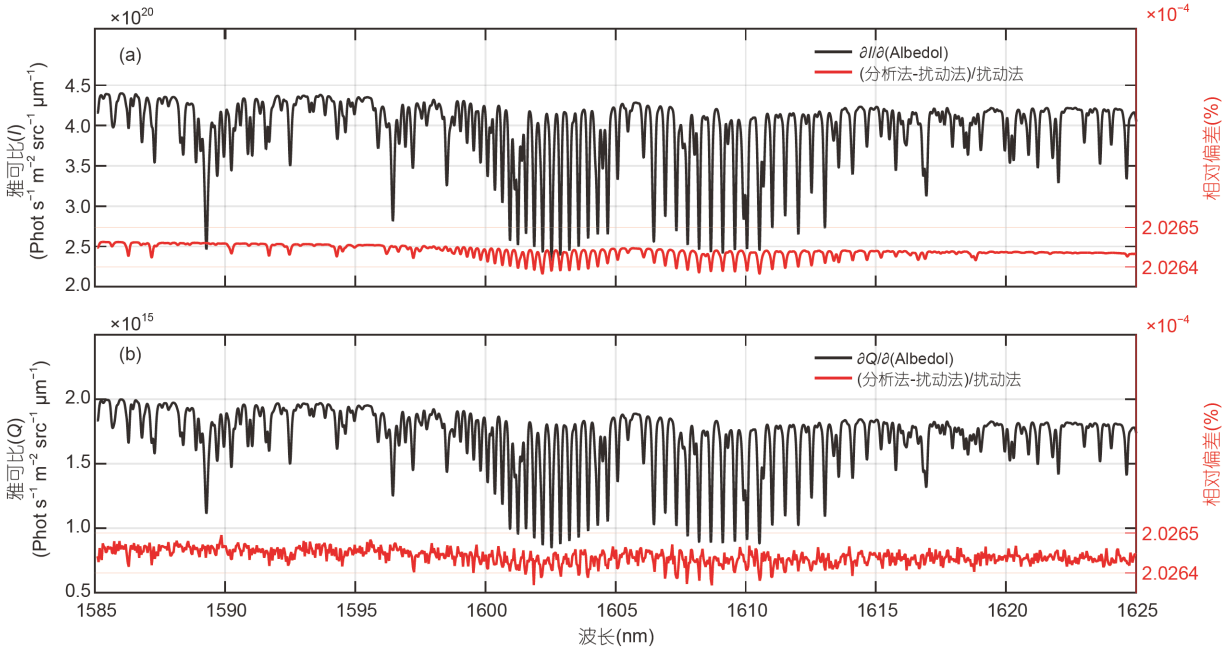


图 8　地表反照率雅克比计算精度验证

胶光学厚度以及地表反照率的雅克比矩阵计算结果. 其中二氧化碳浓度雅克比计算结果与扰动法比较相对偏差在千分之几量级, 气溶胶光学厚度雅克矩阵计算精度优于1.0×10^{-3}%, 地表反照率雅克比计算结果与扰动法比较相对偏差小于2.03×10^{-4}%, 完全满足实际数据反演要求.

本研究是大气偏振辐射传输计算的基础性研究, 为构建近红外波段大气顶偏振辐射量以及其对大气、地表等主要参数雅克比矩阵计算模型, 处理近红外高光谱观测资料有重要作用.

参考文献

白文广, 张鹏, 张文建, 马刚, 漆成莉, 刘辉. 2018. 忽略1.6μm偏振计算对二氧化碳反演精度影响研究. 科学通报, 63: 766–776

白文广, 张鹏, 张文建, 马刚, 漆成莉. 2017. 遥感用途的高光谱中短波红外辐射传输精确计算. 中国科学: 地球科学, 47: 1483–1492

董超华, 李俊, 张鹏. 2013. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社. 5–8

段民征, 吕达仁. 2008. 利用多角度POLDER偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演II: 实例分析. 大气科学, 32: 27–35

高扬, 段民征, 黄兴友. 2010. 典型矢量辐射传输模式计算精度与效率的初步比较. 遥感学报, 14: 845–857

石广玉. 1998. 大气辐射计算的吸收系数分布模式. 大气科学, 22: 659–676

石广玉. 2007. 大气辐射学. 北京: 科学出版社. 150–157

张华, 石广玉. 2000. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法. 大气科学, 24: 111–121

王鼎益, 刘东东. 2018. 碳卫星高光谱数据CO_2柱浓度反演初步研究. 三峡生态环境监测, 3: 67–73

Boesche E, Stammes P, Bennartz R. 2009. Aerosol influence on polarization and intensity in near-infrared O_2 and CO_2 absorption bands observed from space. J Quant Spectr Radiat Transfer, 110: 223–239

Bücker H M, Corliss G F, Paul D H, Uwe N, Boyana N. 2005. Automatic Differentiation: Applications, Theory, and Implementations. New York: Springer. 1–98

Buchwitz M, Reuter M, Bovensmann H, Pillai D, Heymann J, Schneising O, Rozanov V, Krings T, Burrows J P, Boesch H, Gerbig C, Meijer Y, Löscher A. 2013. Carbon monitoring satellite (CarbonSat): Assessment of atmospheric CO_2 and CH_4 retrieval errors by error parameterization. Atmos Meas Tech, 6: 3477–3500

Chen Y, Han Y, Van D P, Weng F Z. 2010. On water vapor Jacobian in fast radiative transfer model. J Geophys Res, 115: D12303

de Haan J F, Bosma P B, Hovenier J W. 1987. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light. Astron Astrophys, 183: 371–391

Duan M Z, Min Q, Lü D R. 2010. A polarized radiative transfer model

based on successive order of scattering. Adv Atmos Sci, 27: 891–900

Evans K F, Stephens G L. 1991. A new polarized atmospheric radiative transfer model. J Quant Spectr Radiat Transfer, 46: 413–423

Emde C, Barlakas V, Cornet C, Evans F, Korkin S, Ota Y, Labonnote L C, Lyapustin A, Macke A, Mayer B, Wendisch M. 2015. IPRT polarized radiative transfer model intercomparison project—Phase A. J Quant Spectr Radiat Transfer, 164: 8–36

Hasekamp O P, Landgraf J, van Oss R. 2002. The need of polarization modeling for ozone profile retrieval from backscattered sunlight. J Geophys Res, 107: 13-1–13-16

Jiang Y, Yung Y L, Sander S P, Travis L D. 2004. Modeling of atmospheric radiative transfer with polarization and its application to the remote sensing of tropospheric ozone. J Quant Spectr Radiat Transfer, 84: 169–179

Jean U, Uwe N, Mike F, Nathan Tt, Michelle S, Patrick H, Chris H, Carl W. 2008. OpenAD/F: A modular, open-source tool for automatic differentiation of fortran codes. ACM Trans Math Softw, 34: 1–36

Kuang Z, Margolis J, Toon G, Crisp D, Yung Y. 2002. Spaceborne measurements of atmospheric CO_2 by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study. Geophys Res Lett, 29: 11-1–11-4

Lenoble J, Herman M, Deuzé J L, Lafrance B, Santer R, Tanré D. 2007. A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols. J Quant Spectr Radiat Transfer, 107: 479–507

Levy R C, Remer L A, Kaufman Y J. 2004. Effects of neglecting polarization on the MODIS aerosol retrieval over land. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 42: 2576–2583

Li J, Li Z, Wang P, Schmit T J, Bai W, Atlas R. 2017. An efficient radiative transfer model for hyperspectral IR radiance simulation and applications under cloudy-sky conditions. J Geophys Res-Atmos, 122: 7600–7613

Liou K N. 2002. An Introduction to Atmospheric Radiation II. San Diego: Academic Press. 317–325

Liu Y, Wang J, Yao L, Chen X, Cai Z, Yang D, Yin Z, Gu S, Tian L, Lu N, Lyu D. 2018. The Tansat mission: Preliminary global observations. Chin Sci Bull, 63: 1200–1207

Mishchenko M I, Travis L D. 1997. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight. J Geophys Res, 102: 16989–17013

Natraj V, Spurr R J D, Boesch H, Jiang Y, Yung Y L. 2007. Evaluation of errors from neglecting polarization in the forward modeling of O_2 A band measurements from space, with relevance to CO_2 column retrieval from polarization-sensitive instruments. J Quant Spectr Radiat Transfer, 103: 245–259

Rozanov V V, Rozanov A V, Kokhanovsky A A, Burrows J P. 2014. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: Software package SCIATRAN. J Quant Spectr Radiat Transfer, 133: 13–71

Rodgers C D. 2000. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore: World Scientific Publishing. 66–79

Shephard M W, Clough S A, Payne V H, Smith W L, Kireev S, Cady-Pereira K E. 2009. Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature and species retrievals: IASI case studies from JAIVEx. Atmos Chem Phys, 9: 7397–7417

Stam D M, De Haan J F, Hovenier J W, Stammes P. 1999. Degree of linear polarization of light emerging from the cloudless atmosphere in the oxygen *A* band. J Geophys Res, 104: 16843–16858

Spurr R J D. 2006. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media. J Quant Spectr Radiat Transfer, 102: 316–342

Takano Y, Liou K N. 1995. Radiative transfer in cirrus clouds. Part III: Light scattering by irregular ice crystals. J Atmos Sci, 52: 818–837

Weng F Z. 1992. A multi-layer discrete-ordinate method for vector radiative transfer in a vertically-inhomogeneous, emitting and scattering atmosphere—I. Theory. J Quant Spectr Radiat Transfer, 47: 19–33

Weng F Z, Liu Q H. 2003. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part I: Forward radiative transfer and Jacobian modeling in cloudy atmospheres. J Atmos Sci, 60: 2633–2646

Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Chen X, Yao L, Lu D R. 2018. First global carbon dioxide maps produced from TanSat measurements. Adv Atmos Sci, 35: 621–623

Zhang F, Yan J R, Li J, Wu K, Iwabuchi H, Shi Y N. 2018. A new radiative transfer method for solar radiation in a vertically internally inhomogeneous medium. J Atmos Sci, 75: 41–55

Zhang P. 2001. The development of a radiation transfer code based on successive orders of scattering method. Proceedings of the International Radiation Symposium—IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation. A Deepak Publishing. 449–452

(责任编委: 刘超)