

基于 MODTRAN 模型使用被动傅里叶变换红外光谱技术对生物气溶胶的探测研究

冯明春 徐亮 刘文清 刘建国 高闽光 魏秀丽

Investigation of detecting biological aerosol by passive Fourier transform infrared spectroscopy technology based on MODTRAN model

Feng Ming-Chun Xu Liang Liu Wen-Qing Liu Jian-Guo Gao Min-Guang Wei Xiu-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014210 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体二维观测方法

Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique

物理学报.2015, 64(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164209>

基于匹配算法的脉冲差分吸收 CO₂ 激光雷达的稳频研究

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for CO₂ detection based on matching algorithm

物理学报.2015, 64(15): 154215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154215>

车载多轴差分吸收光谱探测对流层 NO₂ 分布研究

Detection and distribution of tropospheric NO₂ vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114211>

机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO₂ 二维分布研究

Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne Imaging DOAS technology

物理学报.2015, 64(3): 034217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034217>

温室气体及碳同位素比值红外光谱反演精度的影响因素研究

Influence factors of quantitative analysis precision of greenhouse gases and carbon isotope ratio based on infrared spectroscopy

物理学报.2015, 64(2): 024217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024217>

基于MODTRAN模型使用被动傅里叶变换红外光谱技术对生物气溶胶的探测研究*

冯明春 徐亮† 刘文清 刘建国 高闽光 魏秀丽

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省环境光学监测技术重点实验室, 合肥 230031)

(2015年7月14日收到; 2015年9月15日收到修改稿)

利用MODTRAN模型在水平低仰角探测模式下, 对生物气溶胶探测的问题进行了分析讨论. 用傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱技术对生物气溶胶进行探测研究. 首先介绍了MODTRAN模型的大气模式和廓线, 根据FTIR光谱技术对生物气溶胶的被动探测要求, 利用辐射传输理论和最简单的三层模型, 仿真计算得到大气背景和目标生物气溶胶之间的辐射亮度差 ΔL , 然后对 ΔL 进一步差值得到信号 $\Delta^2 L_t$, 同时再结合光谱仪自身的噪声等效辐射亮度值, 得到实际情况下的信号值 $\Delta^2 L_t$; 最后根据探测条件和MODTRAN提供的大气模式, 使用被动遥测红外光谱方法预测每种大气模式下生物气溶胶的探测限浓度. 每种大气模式下探测限浓度的不同, 是因为边界层温度、透过率和背景辐射亮度的不同所导致, 同时还与生物气溶胶的吸收系数有关. 研究表明, FTIR光谱被动遥测技术能够探测到生物气溶胶的存在, 进一步说明探测生物气溶胶的可行性, 也为生物气溶胶实际探测提供了一种方法.

关键词: MODTRAN, 傅里叶变换红外光谱, 被动遥测, 生物气溶胶

PACS: 42.68.Ca, 42.68.Wt, 92.40.Cy

DOI: 10.7498/aps.65.014210

1 引言

傅里叶变换红外 (Fourier transform infrared, FTIR) 光谱技术由于具有高信噪比、高分辨率和测量速度快等优点, 在大气环境监测领域得到了广泛应用^[1,2]. 在大气监测中, FTIR光谱遥测技术可以分为两种: 主动式和被动式. 根据测量地点和要求的不同, 主动式还可以分为开放光路FTIR光谱测量^[3]和密封样品池FTIR光谱测量^[4]两种基本测量模式; 而被动遥测技术主要有地基太阳光谱FTIR光谱测量^[5]和热烟羽的FTIR光谱测量^[6,7]等. 被动遥测技术除了气体探测外, 近年来国内外开始使用FTIR光谱技术开展对生物气溶胶的被动探测研究.

由于生物气溶胶本身的复杂性, 同时还受到测

量环境和条件的限制, 现有的被动红外遥测实验大多在室内或者是专用的试验场地并在可控条件下开展. 一些研究人员认为^[8], 由于仪器灵敏度不高, 生物气溶胶相对于背景辐射的微弱反射或吸收, 使得对生物气溶胶的遥测可行性还需要进一步探讨. 但一些研究人员采用FTIR光谱技术对生物气溶胶的被动红外遥测实验^[9,10], 成功探测到释放到空气的生物气溶胶, 评估了探测的误警率和概率.

国内对生物气溶胶探测的研究相对开展较晚, 但也进行了这方面的研究工作^[11], 同时结合探测模型和室内试验结果, 讨论了探测模型的合理性、有效性.

本文使用被动红外光谱技术和MODTRAN模型提供的大气模式, 应用辐射传输模型理论和简化的三层模型, 开展了某种生物气溶胶的遥测性能仿

* 国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2013YQ22064302)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB05050302) 和安徽省科技攻关计划 (批准号: 1301041024) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

真研究, 并在此基础上分析了被动遥测的探测限浓度. 本文的研究可以为下一步开展生物气溶胶目标云团的外场遥测实验提供技术支持.

2 模式与方法

MODTRAN [12,13] 是在 LOWTRAN 的基础上改进而成的, 用来说明有害成分的探测情况. MODTRAN 的目的在于改进 LOWTRAN 的光谱分辨率, 已达到了 2 cm^{-1} , MODTRAN 提供了 6 个大气模式, 每一个模式带有合适的温度廓线. 现在用的模式主要有热带 (Tropical, 北纬 15°)、中纬度冬夏季 (MidLatitude Winter and Summer, 北纬 45°)、亚北极区冬夏季 (SubArctic Winter and Summer, 北纬 60°) 及美国标准大气 (1976 US Standard Atmosphere), 如表 1 所列. MODTRAN 的 6 个大气温度廓线如图 1 所示.

表 1 MODTRAN 大气模式
Table 1. MODTRAN atmospheric code.

序号	大气模式	边界层温度/K
1	热带 (Tropical)	299.7
2	中纬度夏季 (MdLt Sum)	294.2
3	中纬度冬季 (MdLt Win)	272.2
4	亚极地夏季 (SbAr Sum)	287.2
5	亚极地冬季 (SbAr Win)	257.2
6	美国标准大气 (1976 Std)	288.2

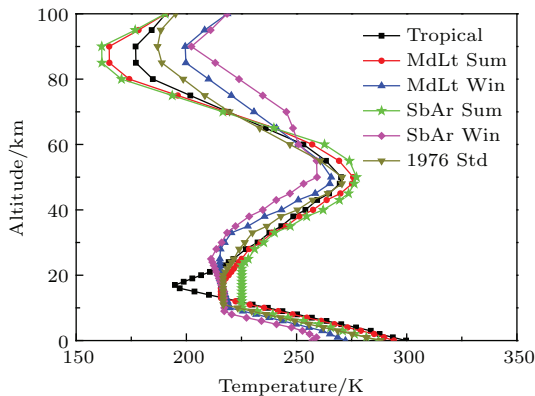


图 1 (网刊彩色) MODTRAN 大气模式温度廓线
Fig. 1. (color online) Temperature profile for MODTRAN atmospheric model.

通常情况下, 红外探测器前的大气可分为多个均匀层, 如图 2 所示.

辐射传输问题可以看作视角范围内均匀的平行层, 每一层都接收到前一层的辐射并对下一层输

出辐射. 对于单个层, 输出光谱辐射亮度 [14] 为

$$L_i = \varepsilon_i B_i^b + \tau_i L_{i-1} + \mu_i, \quad (1)$$

(1) 式中, B_i^b 是 i 层温度的黑体辐射亮度; L_i 是前一层输出的辐射亮度; ε_i 是 i 层的辐射率; τ_i 是 i 层的透过率, $\tau_i = \tau_T \tau_I \tau_A$, 这里 τ_T , τ_I , τ_A 分别是有害气体、干扰物、大气的透过率; μ_i 是 i 层所有物质的散射率. 通常来说, 对于热红外 μ_i 是可以忽略的, 由于 $\varepsilon_i + \tau_i + \mu_i = 1$, 那么 $\varepsilon_i \approx 1 - \tau_T \tau_I \tau_A$, (1) 式化简为

$$L_i = (1 - \tau_T \tau_I \tau_A) B_i^b + \tau_T \tau_I \tau_A L_{i-1}. \quad (2)$$

上述的光谱辐射亮度 L [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$] 和绝对温度 T (K) 由普朗克函数联系为

$$L = \frac{\varepsilon h c^2 \nu^3}{\exp[(h c \nu^3 / k T)] - 1} = \frac{\varepsilon c_1 \nu^3}{\exp[(c_2 \nu / T)] - 1}, \quad (3)$$

(3) 式中, ε 是发射率, h 是普朗克常数 ($6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c 是光速 ($2.99 \times 10^{10} \text{ cm/s}$), k 是玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), ν 是光学波数 (cm^{-1}). 其中, $h c^2 = c_1 = 1.19104 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$, $h c / k = c_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$.

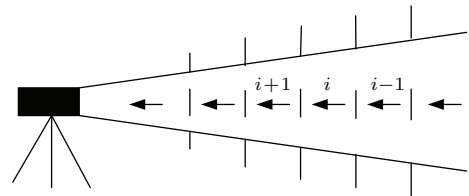


图 2 多层辐射传输模型

Fig. 2. Multilayer radiative transfer model.

3 三层模型

FTIR 光谱技术对污染源排放、污染云团的被动遥测常常采用水平或低仰角测量方式, 在这种情况下一般运用三层模型, 即将观测方向上分为三层考虑, 如图 3 所示. 假定前端大气厚度 0.9 km , 目标云团厚度 0.1 km , 后端大气背景厚度 $\infty \text{ km}$.

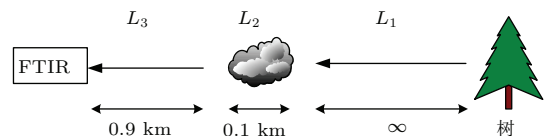


图 3 三层辐射传输模型

Fig. 3. Three-layer radiative transfer model.

第一层为远处背景(天空、山体、建筑物、森林)的辐射,第二层为待测区域的污染云团和大气的辐射,第三层为待测区域到探测器的大气辐射.由辐射原理,第一层的辐射亮度 L_1 可表示为

$$L_1 = L_{bg}, \quad (4)$$

(4) 式中, L_{bg} 为背景辐射亮度.

假定待测区域内无任何干扰物的存在,则第二层的辐射亮度 L_2 可表示为

$$L_2 = \tau_{T_2}\tau_{A_2}L_1 + (1 - \tau_{T_2}\tau_{A_2})B_2^b, \quad (5)$$

(5) 式中, τ_{T_2} , τ_{A_2} 和 B_2^b 分别为第二层有害云团的透过率、大气的透过率和该层温度下对应的黑体辐射亮度.

对于第三层而言,假定没有污染云团或气体和干扰物的存在,则第三层的辐射亮度 L_3 可表示为

$$L_3 = \tau_{A_3}L_2 + (1 - \tau_{A_3})B_3^b, \quad (6)$$

(6) 式中, τ_{A_3} 和 B_3^b 分别为第三层大气的透过率和该层温度下对应的黑体辐射亮度;然后把 (4) 和 (5) 式代入 (6) 式,得到

$$L_3 = \tau_{A_3} [\tau_{A_2}\tau_{T_2}L_{bg} + (1 - \tau_{A_2}\tau_{T_2})B_2^b] + (1 - \tau_{A_3})B_3^b. \quad (7)$$

4 FTIR 光谱测量中的噪声等效辐射亮度 (NESR) 计算分析

在 FTIR 光谱被动遥测中测量的是目标物体的绝对辐射量值,而仪器显示的却是辐射量的相对值,这就要求在仪器使用前和使用过程中进行辐射定标与校正,计算出仪器的 NESR,本文采用的是两点定标来计算 NESR.

使用 FTIR 光谱仪测量不同温度时的黑体辐射光谱,测量光谱波数范围为 $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 64 次,采用液氮制冷型中红外探测器.实验中分别测量了 288, 293 和 298 K 三个温度下的黑体辐射光谱,如图 4 所示.

一个待定标的测量值可表示为

$$S^{\text{Measured}}(\nu) = K(\nu)L^{\text{Source}}(\nu) + M^{\text{Stray}}(\nu), \quad (8)$$

(8) 式中, $K(\nu)$ 是仪器响应函数, $M^{\text{Stray}}(\nu)$ 是辐射偏置量, $S^{\text{Measured}}(\nu)$ 是测量的黑体辐射光谱.分

别使用 288 和 298 K 温度下测量的黑体辐射光谱,再根据黑体辐射普朗克函数 (3) 式计算出这两种温度下的理论辐射亮度,结合 (8) 式求出仪器响应函数和辐射偏置量.通过求出的仪器响应函数和辐射偏置量,再把 293 K 温度下测量的黑体辐射光谱代入 (9) 式,就可以求得该温度下的校正辐射亮度,然后再与理论辐射亮度进行对比(如图 5 所示).

$$L^{\text{Calibrated}}(\nu) = \frac{S^{\text{Measured}}(\nu) - M^{\text{Stray}}(\nu)}{K(\nu)}. \quad (9)$$

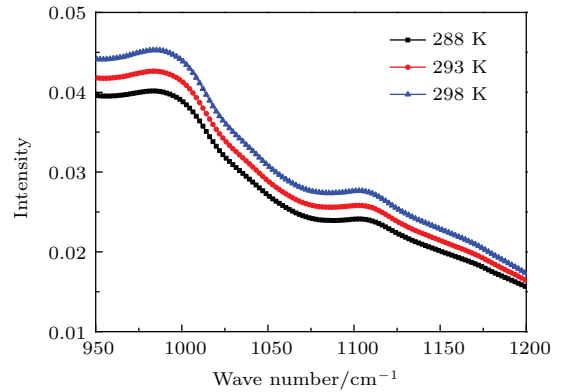


图 4 (网刊彩色) 不同温度下的黑体辐射光谱
Fig. 4. (color online) Blackbody radiation spectrum at different temperature.

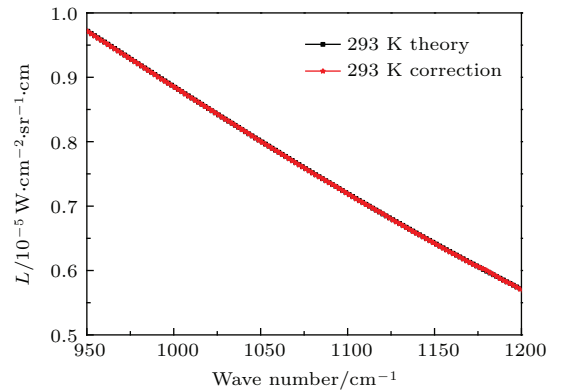


图 5 (网刊彩色) 校正辐射亮度和理论辐射亮度
Fig. 5. (color online) Radiance for correction and theory.

然后对定标的辐射亮度与理论辐射亮度进行差值,得到两者之间的相对偏差,即 NESR,如图 6 所示,计算得到 NESR 的均方根为 $5.36 \times 10^{-9}\text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$.其中所显示波数范围为 $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$,这是因为遥测仿真探测的该生物气溶胶吸收波数在此范围内^[15],如图 7 所示.

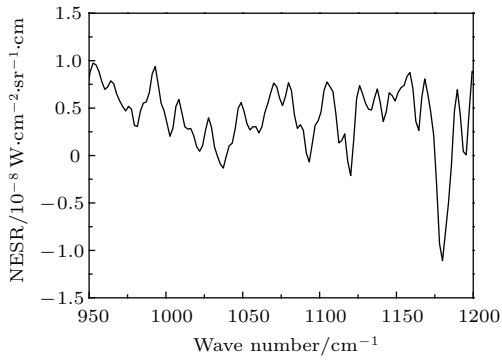


图6 校正辐射亮度和理论辐射亮度的相对偏差

Fig. 6. Radiance differences between correction and theory.

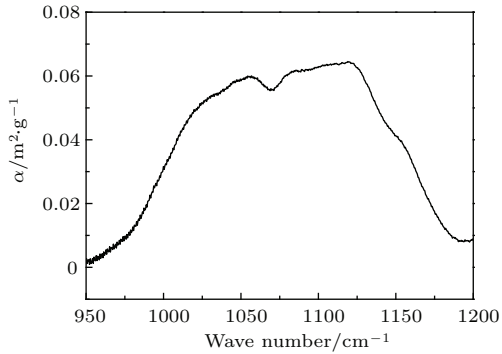


图7 生物气溶胶的吸收系数

Fig. 7. Absorption coefficient of biological aerosol.

5 生物气溶胶云团的遥测性能仿真

根据红外光谱遥测系统及其所基于的辐射传输理论, 通过辐射传输模型和实测的仪器噪声数据, 借助MODTRAN模型对系统的遥测性能进行评估.

基于水平仰角测量方式, 同时假定生物气溶胶及其周围是均匀的, 即令 $B_2^b = B_3^b = B_{bl}^b$, 将第二层的大气透过率与第三层大气透过率合并考虑, 即 $\tau_A = \tau_{A_2}\tau_{A_3}$, 并简化(7)式, 可以得到

$$L_3 = B_{bl}^b + \tau_A \tau_{T_2} (L_{bg} - B_{bl}^b), \quad (10)$$

(10)式中, B_{bl}^b 和 τ_A 分别为边界层温度下对应的黑体辐射亮度和1 km下对应的大气透过率. (10)式可以改写为

$$L_{bg} = \frac{L_3 - B_{bl}^b}{\tau_A \tau_{T_2}} + B_{bl}^b, \quad (11)$$

(11)式中, L_{bg} 为上述的背景辐射亮度 L_1 . 遥测的可行性取决于(10)式中 L_3 与 B_{bl}^b 辐射亮度差 ΔL , 即

$$\Delta L = L_3 - B_{bl}^b = \tau_A \tau_{T_2} (L_{bg} - B_{bl}^b). \quad (12)$$

对(12)式进一步差值, 即云团存在时的 ΔL_t 与无云团时的 ΔL 之差, 得到信号:

$$\Delta^2 L_t = \Delta(\Delta L). \quad (13)$$

(13)式中, 下标t表示目标生物气溶胶云团的存在. 如果想要得到(13)式的计算结果, 需要得到(12)式的计算结果, 进一步需要知道大气透过率 τ_A 、生物气溶胶云团透过率 τ_{T_2} 、背景辐射亮度 L_{bg} 和边界层温度下的辐射亮度 B_{bl}^b . 根据MODTRAN提供的6种大气模式, 可以仿真计算得到每种大气模式1 km下的大气透过率, 如图8所示. 边界层温度下的辐射亮度 B_{bl}^b , 可以由每种大气模式下的边界层温度来计算. 如何得到背景辐射亮度 L_{bg} 将非常关键, 可以根据(11)式来计算得到 L_{bg} , 因为 L_3 和 τ_A 可以由MODTRAN仿真计算得到, 同时仿真过程中假定不存在 τ_{T_2} , 再结合 B_{bl}^b , 就可以得到 L_{bg} . 计算得到的每种大气模式下的 L_{bg} , 如图9所示.

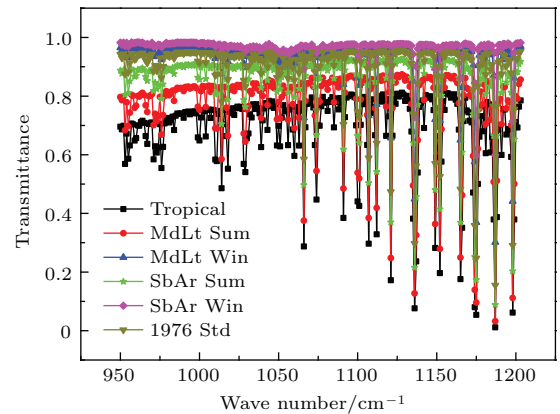


图8 (网刊彩色) 大气透过率

Fig. 8. (color online) Atmospheric transmittance.

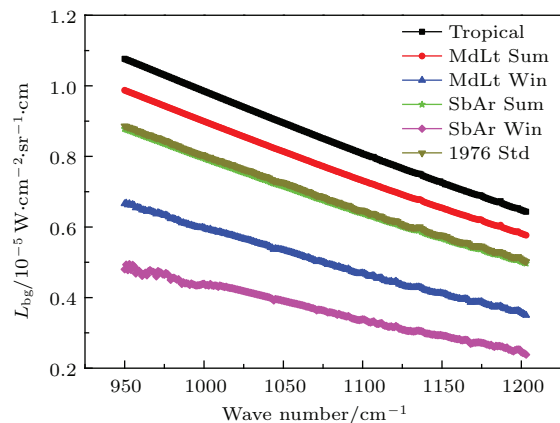


图9 (网刊彩色) 背景辐射亮度

Fig. 9. (color online) Background radiance.

生物气溶胶云团透过率 τ_{T_2} 则由仿真的生物气溶胶云团吸收系数计算得到, 即

$$\tau_{T_2} = \exp^{-\alpha \rho l}, \quad (14)$$

(14) 式中, α 为目标生物气溶胶云团的吸收系数 (m^2/g), ρ 为浓度 (g/m^3), l 为云团的厚度 (m).

使用 MODTRAN 提供的大气模式, 计算得到每种大气模式下无生物气溶胶云团在水平观测角度时的 ΔL 光谱, 如图 10 所示.

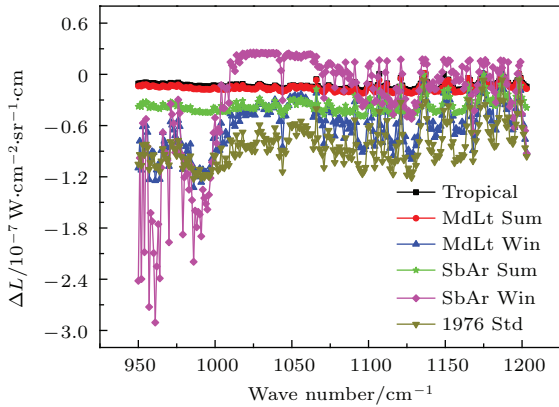


图 10 (网刊彩色) 水平观测角度下的 ΔL 光谱

Fig. 10. (color online) ΔL spectrum at 0° observation angle.

存在生物气溶胶云团观测路径时, 如果生物气溶胶云团浓度太低, 就有可能观测不到. 通常认为, 如果信号高于噪声的均方根 (RMS) 5 倍, 则可以使误警率降低至 $1/500000$ 以下 [16], 假定测量速度是每秒钟完成一次测量, 那么可以确保大约 140 h 的连续无误警工作. 计算得到 NESR 的均方根为 $5.36 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, 欲确保 $1/500000$ 的误警率, 则信号 $\Delta^2 L_t = \Delta(\Delta L)$ 的幅值须达到 NESR 均方根的 5 倍, 即 $2.68 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$. 根据此条件, 同时考虑光谱仪自身 NESR 的前提下, 计算出 6 种模式下的探测限浓度, 其结果列于表 2.

表 2 探测限浓度

Table 2. Detection limit concentration

序号	大气模式	探测限浓度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	$\Delta^2 L_t / \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$
1	热带	125.0	1.62×10^{-8}
2	中纬度夏季	39.90	1.75×10^{-8}
3	中纬度冬季	3.725	5.17×10^{-8}
4	亚极地夏季	8.315	2.96×10^{-8}
5	亚极地冬季	4.445	4.71×10^{-8}
6	美国标准大气	2.985	6.16×10^{-8}

从表 2 可以看出, 每种大气模式下所对应的探测限浓度是不同的, 这是因为每种大气模式下边界层温度、透过率和背景辐射亮度的不同所致, 同时还与生物气溶胶的吸收系数有关. 根据上述探测限浓度, 对假定探测路径上存在 $\rho l = 10 \text{ g}/\text{m}^2$ 生物气溶胶的 ΔL_t 光谱做图, 如图 11 所示.

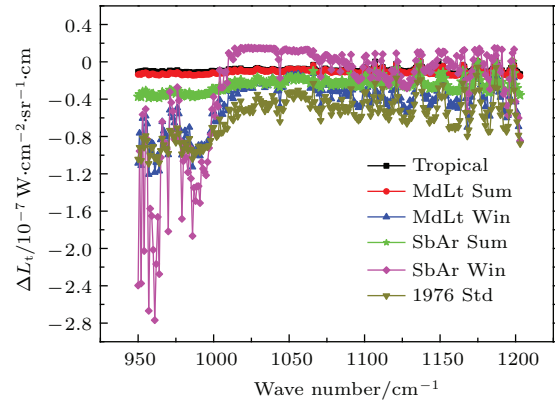


图 11 (网刊彩色) 生物气溶胶的 ΔL_t 光谱

Fig. 11. (color online) ΔL_t spectrum of biological aerosol.

然后对图 11 的生物气溶胶云团 ΔL_t 与图 10 的无生物气溶胶云团 ΔL 进一步差值, 得到信号的 $\Delta^2 L_t$ 光谱, 如图 12 所示.

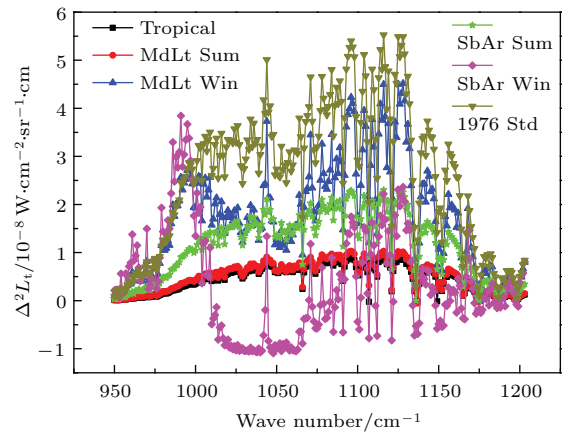


图 12 (网刊彩色) 无叠加实测 NESR 的 $\Delta^2 L_t$ 光谱

Fig. 12. (color online) $\Delta^2 L_t$ spectrum in Fig. 10 and Fig. 11.

图 12 显示的 $\Delta^2 L_t$ 没有加上仪器自身的 NESR, 如果再加上前面所分析的 NESR, 得到如图 13 所示的 $\Delta^2 L_t$ 光谱.

从图 13 可以看出, 在探测浓度为 $10 \text{ g}/\text{m}^2$ 时, 除去热带和中纬度夏季两个大气模式外, 其他 4 个大气模式符合探测的条件, 这是因为在这 4 个大气模式下 $\Delta^2 L_t$ 的幅值在 $2.68 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 以上, 具体数值见表 2 最后一列. 从表 2 还

可以看出, 热带和中纬度夏季两个大气模式所对应的探测限浓度高于其他4个大气模式所对应的探测限浓度, 主要原因是热带和中纬度夏季大气模式的边界层温度明显高于其他4个大气模式的边界层温度.

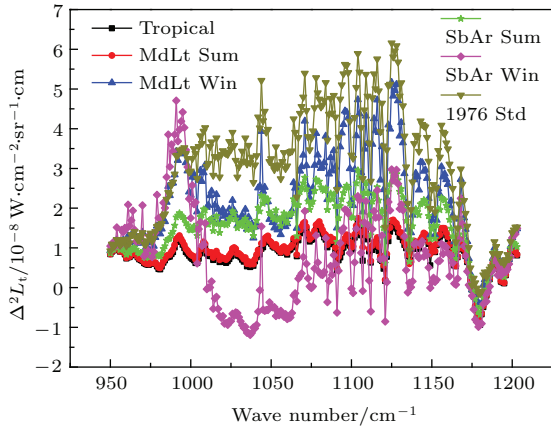


图 13 (网刊彩色) 叠加实测 NESR 的 $\Delta^2 L_t$ 光谱
Fig. 13. (color online) $\Delta^2 L_t$ spectrum in Fig. 12 plus NESR.

6 结 论

本文主要分析了被动遥测中的红外辐射传输理论、三层模型、生物气溶胶云团的遥测性能仿真以及每种大气模式下对应的探测限浓度. 仿真结果表明, 在水平观测时 FTIR 光谱技术能够探测到生物气溶胶云团的存在, 说明被动遥测的可行性. 本文的研究方法为进一步使用红外被动遥测技术和实现 FTIR 光谱技术对生物气溶胶云团实际观测提供了性能评估手段.

参考文献

- [1] Xu L, Liu J G, Gao M G, Lu Y H, Wei X L, Zhang T S, Zhu J, Chen J 2007 *Spectrosc. Spect. Anal.* **27** 448 (in Chinese) [徐亮, 刘建国, 高闽光, 陆亦怀, 魏秀丽, 张天舒, 朱军, 陈军 2007 光谱学与光谱分析 **27** 448]
- [2] Gao M G, Liu W Q, Zhang T S, Liu J G, Lu Y H, Zhun J, Lian Y, Lu F 2005 *Spectrosc. Spect. Anal.* **25** 1042 (in Chinese) [高闽光, 刘文清, 张天舒, 刘建国, 陆亦怀, 朱军, 连悦, 陆钊 2005 光谱学与光谱分析 **25** 1042]
- [3] Marshall T L, Chaffin C T, Hammaker R M, Fateley W G 1994 *Environ. Sci. Technol.* **28** 224A
- [4] Feng M C, Gao M G, Xu L, Chen S Y, Tong J J, Jin L, Li S, Wei X L, Li X X, Jiao Y, Liu W Q 2011 *Laser Infrared* **41** 1201 (in Chinese) [冯明春, 高闽光, 徐亮, 程巳阳, 童晶晶, 金岭, 李胜, 魏秀丽, 李相贤, 焦洋, 刘文清 2011 激光与红外 **41** 1201]
- [5] Liu X, Murcray F J, Murcray D G, Russell J M 1996 *J. Geophys. Res. Atmos.* **101** 10175
- [6] Oppenheimer C, Francis P, Burton M, Maciejewski A J H, Boardman L 1998 *Appl. Phys. B* **67** 505
- [7] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong J J, Zhang T S, Xu L, Wei X L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4184
- [8] Ligon D A, Wetmore A E, Gillespie P S 2002 *Opt. Express* **10** 909
- [9] David A B, Ren H 2003 *Appl. Opt.* **42** 4887
- [10] David A B 2003 *Opt. Express* **11** 418
- [11] Lan T G, Xiong W, Fang Y H, Li D C, Yuan Y M 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1656 (in Chinese) [兰天鸽, 熊伟, 方勇华, 李大成, 袁越明 2010 光学学报 **30** 1656]
- [12] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C 1989 *Air Force Geophysics Laboratory GL-TR-89-0122 AD-A214 337*
- [13] Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, Chetwynd J H, Anderson G P, Gallery W O, Selby J E A, Clough S A 1988 *Air Force Geophysics Laboratory AFGL-TR-88-0177 AD-A206 773*
- [14] Flanigan D 1995 *Appl. Opt.* **34** 2636
- [15] Feng M C, Xu L, Gao M G, Jiao Y, Wei X L, Jin L, Chen S Y, Li X X, Feng S X 2012 *Spectrosc. Spect. Anal.* **32** 3193 (in Chinese) [冯明春, 徐亮, 高闽光, 焦洋, 魏秀丽, 金岭, 程巳阳, 李相贤, 冯书香 2012 光谱学与光谱分析 **32** 3193]
- [16] Wilmot D W, Owens W R, Shelton R J 1993 *SPIE* **7** 57

Investigation of detecting biological aerosol by passive Fourier transform infrared spectroscopy technology based on MODTRAN model*

Feng Ming-Chun Xu Liang[†] Liu Wen-Qing Liu Jian-Guo Gao Min-Guang Wei Xiu-Li

(Key Lab of Anhui Province for Environmental Optical Monitoring Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 14 July 2015; revised manuscript received 15 September 2015)

Abstract

The problem of detecting the biological aerosol at low elevation angle is analyzed and discussed by using MODTRAN model. First of all, the atmospheric model and profile of MODTRAN model are introduced for the biological aerosol detection by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. According to the passive detection of biological aerosol by FTIR spectroscopy, the radiation brightness difference ΔL between the background and the target biological aerosol is calculated by using the radiative transfer theory and the simplest three-layer model. The signal value $\Delta^2 L_t$ under the actual circumstance is derived from the derivative of ΔL combined with the noise equivalent spectral radiance value of the spectrometer. Finally, the detection limit of biological aerosol for each atmospheric mode is predicted with the passive remote sensing method. The limit concentration of detection for each atmospheric mode is different due to the differences in boundary layer temperature, transmittance, and background radiation brightness of atmospheric model, and it is also related to the absorption coefficient of biological aerosol. It is shown that the passive remote sensing of FTIR technology can detect the presence of the biological aerosol. Therefore, the detection of the biological aerosol is feasible. It presents a method of detecting the biological aerosol cloud under the actual circumstance.

Keywords: MODTRAN, Fourier transform infrared spectroscopy, passive remote sensing, biological aerosol

PACS: 42.68.Ca, 42.68.Wt, 92.40.Cy

DOI: [10.7498/aps.65.014210](https://doi.org/10.7498/aps.65.014210)

* Project supported by the Special Funds of the Major Scientific Instruments Equipment Development of China (Grant No. 2013YQ22064302), the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB05050302), and the Key Science and Technology Program of Anhui Province, China (Grant No. 1301041024).

[†] Corresponding author. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn