

面阵探测下的污染云团红外光谱仿真

王安静 方勇华 李大成 崔方晓 吴军 刘家祥 李扬裕 赵彦东

Simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting

Wang An-Jing Fang Yong-Hua Li Da-Cheng Cui Fang-Xiao Wu Jun Liu Jia-Xiang Li Yang-Yu
Zhao Yan-Dong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 114203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.114203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于叠层衍射成像的二元光学元件检测研究

[Detection of the binary optical element based on ptychography](#)

物理学报.2017, 66(9): 094201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094201>

基于 gyration 变换和矢量分解的非对称图像加密方法

[Asymmetric image encryption method based on gyration transform and vector operation](#)

物理学报.2016, 65(21): 214203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214203>

并行化叠层成像算法研究

[Ptychographical algorithm of the parallel scheme](#)

物理学报.2016, 65(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154203>

半波片角度失配对通道调制型偏振成像效果的影响及补偿

[Effect of half wave plate angle mismatch on channel modulating imaging result and its compensation](#)

物理学报.2016, 65(13): 134202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134202>

多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像

[Incoherent ptychography in Fresnel domain with simultaneous multi-wavelength illumination](#)

物理学报.2016, 65(12): 124201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124201>

面阵探测下的污染云团红外光谱仿真*

王安静¹⁾²⁾ 方勇华^{1)†} 李大成¹⁾ 崔方晓¹⁾ 吴军¹⁾ 刘家祥¹⁾
李扬裕¹⁾ 赵彦东¹⁾²⁾

1) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学科学岛分院, 合肥 230026)

(2016年12月16日收到; 2017年2月21日收到修改稿)

研究污染云团的红外光谱仿真, 对于利用仿真光谱进行光谱识别的算法研究十分重要. 在单元探测器探测方式下污染云团的红外光谱仿真研究取得了一定成果, 并且已经被应用于识别算法的研究工作中. 针对基于成像光谱仪的污染云团识别算法研究缺乏实测数据的问题, 利用具有高仿真精度的基于物理模型的污染云团扩散模型及其仿真结果网格化的特点, 研究相应的云团红外光谱仿真多层模型, 提出了面阵探测方式下污染云团红外光谱的仿真方法, 生成了同时具有光谱维和空间维信息的数据立方体, 为该研究领域提供了新的研究方法. 提出的面阵探测方式下的污染云团红外光谱仿真直观地反映了污染云团的扩散, 提供了完备且符合实际情况的污染云团红外光谱立方体数据, 对于提高和完善红外光谱识别算法具有重要意义.

关键词: 红外光谱, 污染云团扩散, 面阵探测, 光线追踪

PACS: 42.30.-d, 51.10.+y, 68.43.-h, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.66.114203

1 引言

为了预防和解决污染气体泄漏造成的工业生产和人民生命财产安全问题, 人们研究了利用红外光谱技术探测并识别污染云团的方法, 为污染气体泄漏的快速定位及其化学成分的有效识别提供了可能. 为了解决探测系统识别算法所需的实测红外光谱数据缺乏这一问题, 人们又提出了用仿真的污染云团的红外光谱数据来补充实测光谱数据的方法.

已有的工作在确定合适的污染云团扩散模式和建立正确的红外光谱仿真模型的基础上, 研究了单元探测器探测方式下污染云团的红外光谱仿真^[1-4]. 随着探测技术的发展, 开始采用基于面阵探测的成像光谱仪来探测污染云团. 在面阵探测条件下, 可以同时获取污染云团扩散的空间维和光谱维信息, 即获得一个由数十万条光谱数据组成的数据立方体. 与此同时, 还需要有适合面阵探测方式

的云团气体识别算法, 但是在算法的研究与完善过程中缺乏大量的实测云团红外立方体数据. 本文以此为出发点, 研究面阵探测方式下云团红外光谱数据的仿真方法, 生成仿真的云团红外光谱立方体数据, 试图弥补云团红外成像光谱数据的缺失.

本文在云团扩散模型^[5-12]的基础上, 研究了适用于面阵探测方式的云团红外光谱仿真模型, 根据面阵探测器的参数设置, 结合仿真的云团扩散数据, 采用光线追踪算法, 生成了仿真的云团红外光谱数据立方体. 分别将仿真的云团扩散数据及其光谱数据立方体与相应的实测数据进行比较, 取得了预期结果.

2 基本原理

2.1 基于物理模型的连续点源云团扩散

与传统的基于高斯模型的云团模型相比^[3,13-15], 基于物理模型的云团扩散模型能够

* 国家自然科学基金 (批准号: 41505020) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn

更为精确地描述污染云团的实际扩散情况. 对于污染云团, 其扩散规律可以用不可压无黏流体的奈维斯托克斯 (N-S) 方程描述, 即

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\mu} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\mu}}{\partial t} = -(\boldsymbol{\mu} \cdot \nabla) \boldsymbol{\mu} - \nabla p + \boldsymbol{f}, \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\mu}$ 为流体速度, p 为流体压强, \boldsymbol{f} 为流体所受的外力. (1) 式由有限体积内流体的质量守恒定律推导得到, 称为质量方程. (2) 式根据有限体积内流体的动量守恒定律推导得到, 称为动量方程.

将用于仿真的污染云团对象划分为求解网格并确定初始条件和边界条件后, 通过求解 N-S 方程 [5-12], 就可以实时地得到污染云团各时刻各网格点上的浓度分布场 $C_{i,j,k}$ 和温度分布场 $T_{i,j,k}$, 其中 i, j, k 为网格单元的空间坐标.

2.2 基于物理模型的连续点源云团红外光谱仿真

2.2.1 单元探测下的云团三层红外光谱仿真模型

单元探测下的云团红外光谱仿真采用三层模型 [1-4,16,17] (图 1), 即大气、云团和背景物. 红外探测器接收的辐射光谱计算公式为

$$L(\nu) = [1 - \tau_1(\nu)] B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu) [(1 - \tau_2(\nu)) \times B_2(\nu, T_2) + \tau_2(\nu) L_3(\nu)], \quad (3)$$

式中 ν 为波数, $\tau_1(\nu)$ 为红外探测器与云团之间的大气透过率, T_1 为大气温度; $\tau_2(\nu)$ 为云团的透过率, T_2 为云团温度; $B(\nu, T)$ 为等效黑体辐射亮度谱, $L_3(\nu)$ 为背景物光谱.

(3) 式可进一步变为

$$L(\nu) = [1 - \tau_1(\nu)] B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu) L_{2-3}(\nu), \quad (4)$$

式中 $L_{2-3}(\nu)$ 表示从云团开始到背景物的辐射光谱. (4) 式意为探测器接收的辐射等于大气自身的辐射和大气透过的辐射之和.

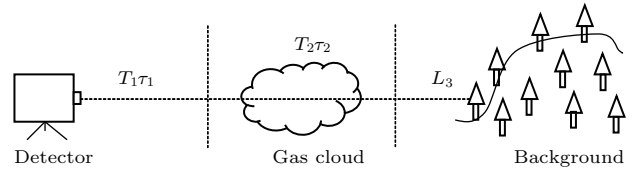


图 1 云团红外光谱三层模型示意图

Fig. 1. Three-layer model of the gas cloud infrared spectrum.

2.2.2 面阵探测下的云团多层红外光谱仿真模型

2.2.1 节讨论的云团红外光谱三层模型将云团看作具有一定厚度的浓度均衡的整体, 而实际云团具有一定的浓度分布, 将其看作一个整体实质上是对问题的简化. 在面阵探测方式下, 面阵上各探测单元接收的信号来自云团的不同部位, 因此不能再采用简单的三层模型, 需要将云团看作由许多具有一定厚度和浓度的云团分子组成的多层结构.

为了得到面阵探测器上各单元的红外光谱, 需利用光线追踪算法 [18-20] 从面阵探测器的各探测单元发出一条光线穿过云团并累积计算其路径上的红外辐射, 如图 2 所示.

在多层模型下, 面阵探测器某一探测单元上的辐射光谱为

$$L(\nu) = [1 - \tau_1(\nu)] B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu) L_{2-3b}(\nu), \quad (5)$$

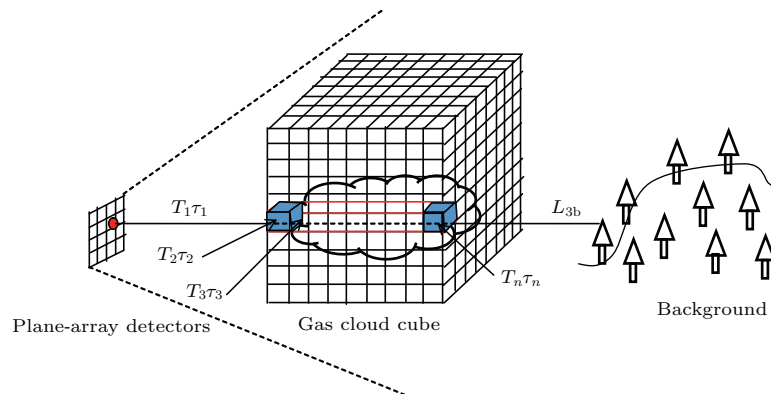


图 2 (网刊彩色) 云团红外光谱多层模型示意图

Fig. 2. (color online) Schematic of multiple-layer model of the gas cloud infrared spectrum.

其中

$$\begin{cases} L_{2-3b}(\nu) \\ = [1 - \tau_2(\nu)] B_2(\nu, T_2) + \tau_2(\nu) L_{3-3b}(\nu), \\ L_{3-3b}(\nu) \\ = [1 - \tau_3(\nu)] B_3(\nu, T_3) + \tau_3(\nu) L_{4-3b}(\nu), \\ \vdots \\ L_{n-3b}(\nu) \\ = [1 - \tau_n(\nu)] B_n(\nu, T_n) + \tau_n(\nu) L_{3b}(\nu), \end{cases} \quad (6)$$

式中 $L_{i-3b}(\nu)$, $i = 2, 3, \dots, n$, 表示从第 i 层云团分子开始到背景的辐射光谱; $\tau_i(\nu)$ 表示第 i 层云团分子的透过率; T_i 表示第 i 层云团分子的温度; $B_i(\nu, T_i)$ 为对应温度下的等效黑体辐射. (5) 式可进一步变为一个嵌套形式的公式:

$$\begin{aligned} L(\nu) = & [1 - \tau_1(\nu)] B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu) \{ [1 - \tau_2(\nu)] \\ & \times B_2(\nu, T_2) + \tau_2(\nu) \{ [1 - \tau_3(\nu)] B_3(\nu, T_3) \\ & + \tau_3(\nu) \{ \dots \{ [1 - \tau_n(\nu)] B_n(\nu, T_n) \\ & + L_{3b}(\nu) \} \} \} \}. \end{aligned} \quad (7)$$

如此通过光线追踪的递归计算, 当光线到达背景物后, 得到该单元的光谱, 最后将所有探测单元的光谱综合起来, 得到一个光谱数据立方体.

此时, 引入无云团时的背景光谱 $L_b(\nu)$, 即

$$L_b(\nu) = [1 - \tau_1(\nu)] B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu) L_{3b}(\nu). \quad (8)$$

在实际的云团扩散中, 可以认为云团与大气迅速融合, 其温度和压力也将快速与大气达成一致. 因此, 认为 $T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n$, 进一步得到 $B_1(\nu, T_1) = B_2(\nu, T_2) = B_3(\nu, T_3) = \dots = B_n(\nu, T_n)$. 此时, 联立 (7) 式和 (8) 式, 得到探测器单元的最终光谱计算公式为

$$\begin{aligned} L(\nu) = & [1 - \tau_2(\nu)\tau_3(\nu)\dots\tau_n(\nu)] B_1(\nu, T_1) \\ & + \tau_2(\nu)\tau_3(\nu)\dots\tau_n(\nu)L_b(\nu). \end{aligned} \quad (9)$$

利用 (9) 式, 在已知无云团时的背景光谱和大气温度的条件下利用光线追踪并行计算面阵探测器各单元的透过率, 即可实现面阵探测方式下云团红外光谱的仿真, 即

$$\tau_i(\nu) = \exp[-\alpha(\nu)c_i l], \quad (10)$$

式中 $\alpha(\nu)$ 为云团气体的红外吸收系数, c_i 为第 i 层云团分子的浓度, l 为网格单元长度.

3 实验结果

3.1 云团扩散仿真及其红外光谱数据立方体仿真

3.1.1 云团扩散的仿真

模拟实例为工业生产中管道泄漏造成的污染云团扩散问题. 实验中用一个距离地面约 1 m 的装满氨气的气瓶向外释放气体来模拟管道泄漏, 气瓶阀门近似看作管道的泄漏口, 成像光谱仪拍摄的实验现场如图 3 所示. 成像光谱仪架设点和气体释放点相距 200 m, 气体释放点位于光谱仪视场 (FOV) 的水平中线上, 至视场边缘的距离为 20 m.

实验当天天气晴朗, 平均气温 301 K, 平均风速 2.5 m/s. 实验用某型号的红外成像光谱仪获取云团的实时红外光谱立方体数据, 其空间分辨率为 320 pixel × 256 pixel, 红外波段为 8—12 μm, 光谱分辨率为 2 cm⁻¹.

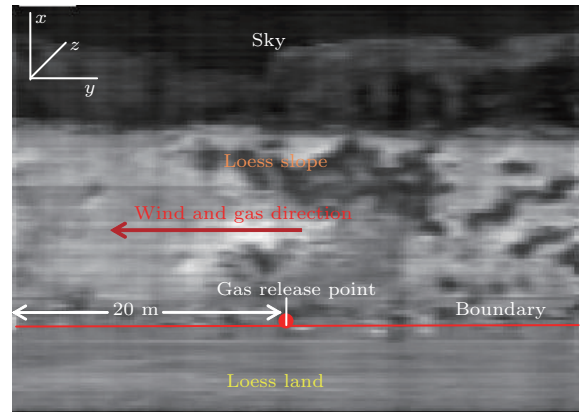


图3 成像光谱仪拍摄的实验现场

Fig. 3. Experimental field shot by imaging spectrometer.

采用基于物理模型云团扩散模型仿真云团扩散, 首先需要确定仿真实空间并对其进行网格划分. 考虑到模型的计算效率和仿真云团扩散的完整性, 选择云团的实际扩散范围作为仿真实空间. 根据实际情况, 仿真实空间选择条件如下: 以气体释放位置为起始点, 向左沿 y 轴延伸 50 m, 向上沿 x 轴延伸 10 m, 向前向后沿 z 轴分别延伸 5 m, 构成一个 x , y 和 z 维度大小分别为 10, 50, 10 m 的立体空间.

图 4 为仿真实空间的网格划分、初始条件和边界条件设置示意图, 各维度上的网格间距均为 0.5 m; 气瓶高度为 1 m, 将其放置在仿真实空间的最右侧; 气体泄漏方向为水平向左; 风速为水平向左 2.5 m/s; 下垫面为平坦地面.

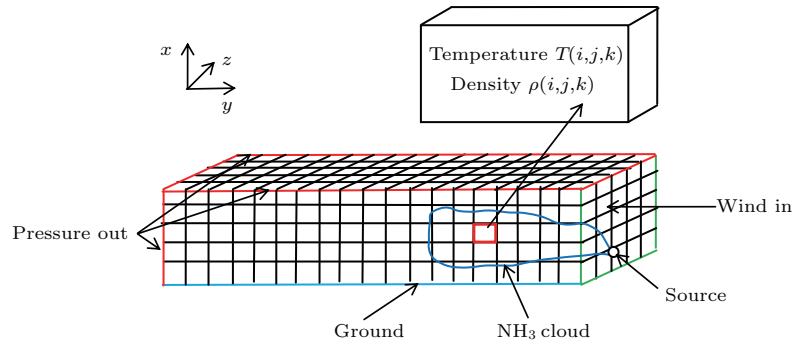


图4 (网刊彩色) 仿真云团扩散示意图

Fig. 4. (color online) Explosion of simulated gas cloud.

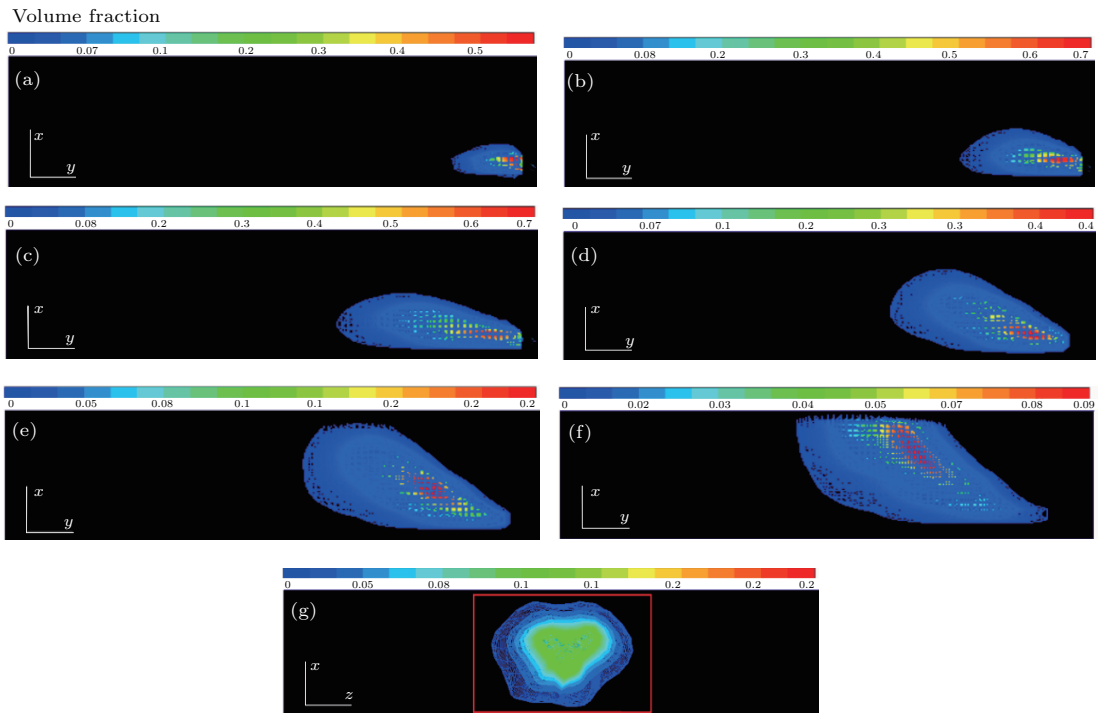


图5 (网刊彩色) 云团扩散仿真结果 (a) $t = 1$ s, xy 面视图; (b) $t = 5$ s, xy 面视图; (c) $t = 10$ s, xy 面视图; (d) $t = 11$ s, xy 面视图; (e) $t = 15$ s, xy 面视图; (f) $t = 19$ s, xy 面视图; (g) $t = 15$ s, xz 面视图

Fig. 5. (color online) Results of simulated gas cloud explosion: (a) The xy plane view when $t = 1$ s; (b) the xy plane view when $t = 5$ s; (c) the xy plane view when $t = 10$ s; (d) the xy plane view when $t = 11$ s; (e) the xy plane view when $t = 15$ s; (f) the xy plane view when $t = 19$ s; (g) the xz plane view when $t = 15$ s.

实验中气瓶内的氨气储量有限, 造成氨气云团扩散的形式为: 开始释放时, 其扩散为连续点源扩散, 云团始终以连续形式从气瓶阀门向外扩散; 到大约 10 s 的时刻, 氨气全部释放完毕后, 云团扩散形式变为无源自由扩散. 仿真的云团扩散结果如图 5 所示, 图中颜色指示条表示云团中氨气的体积分数.

图 5 中, 在 $t = 0-10$ s 这段时间内, 云团的扩散是连续的, 其起点始终是气瓶阀门位置; 从 $t = 11$ s 开始, 云团的扩散不再连续, 整体随风向左

侧扩散, 渐渐远离气瓶阀门位置. 其中, 图 5(a)—图 5(f) 为 xy 面视图, 图 5(g) 为 xz 面视图, 整个云团呈现出三维立体扩散的形式, 符合经验的云团扩散规律.

3.1.2 仿真云团的红外数据立方体

要获得仿真云团红外光谱数据立方体, 首先需要根据成像光谱仪的仪器参数 (如空间分辨率 $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$; 光谱分辨率 2 cm^{-1} ; 红外波段 $8-12 \text{ }\mu\text{m}$)、云团扩散场分布数据和实验的现场布置来设置光线追踪器的仿真参数. 然后启动光线

追踪程序, 实时计算各时刻各像素单元云团的透过率. 最后结合实测的背景光谱数据, 利用云团多层红外光谱计算公式((9)式), 得到各时刻仿真的云团红外光谱数据立方体(图6).

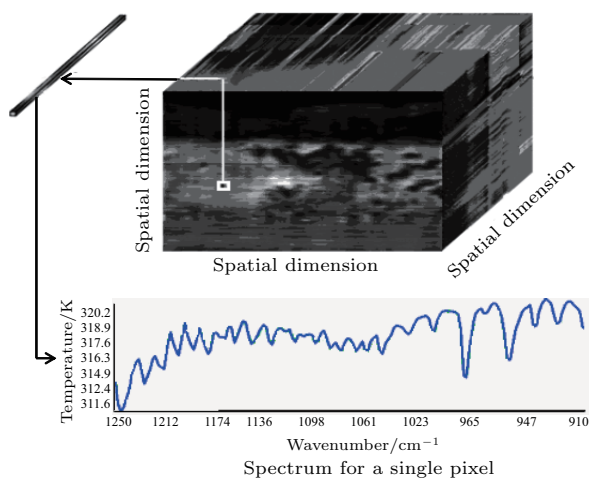


图6 红外光谱数据立方体示意图

Fig. 6. Schematic of infrared spectrum data cube.

3.2 云团扩散及其红外光谱数据立方体的实测数据与仿真结果对比

3.2.1 云团实际扩散与仿真结果对比

为了进一步验证基于物理模型的云团扩散模型仿真结果的正确性, 将仿真的云团扩散结果与实际云团扩散进行比较. 为此, 从测量的光谱质量较高的实测云团数据立方体中挑选了三组能较好地反映云团扩散过程的实验数据与云团扩散仿真结果进行对比, 同时也用于云团光谱仿真的对比. 利用一组实测的背景数据, 将实测的三组数据转化为三组差谱^[3]数据, 在氨气吸收特征主峰 964 cm^{-1} 处对差谱数据进行切片图像显示, 获得实际云团的扩散范围, 根据峰值大小确定各像素单元云团相对浓度的大小并以伪彩色形式叠加到场景图上. 对应地, 从云团仿真结果中, 挑选三个相同时间点的数据放置到场景中, 利用光线追踪的方法累积计算各像素单元的云团浓度, 最后以同样的伪彩色方法叠加到场景图上, 图7为实际云团扩散与仿真云团扩散的对比.

图7中均采用伪彩色来示意云团扩散的浓度分布情况, 其中各像素单元的云团浓度均为 z 轴方向上的累积浓度. 在实测的和仿真的图像上将各像素单元的累积浓度都用归一化的相对浓度来表示(红色表示值最大, 蓝色表示值最小), 以方便比较.

首先分析三组实际云团扩散情况, 图7(a)为 $t = 11\text{ s}$ 时采集的数据, 从云团扩散情况来看, 云团中心最大气体浓度位置离释放点有一定距离, 说明此时气体已释放完毕, 云团处于无源扩散状态; 图7(c)为 $t = 13\text{ s}$ 时采集的数据, 此时云团整体继续向左移动, 其中心部位较 $t = 11\text{ s}$ 时更靠左; 图7(e)为 $t = 18\text{ s}$ 时采集的数据, 此时云团中心已接近视场边缘.

分析仿真的三组云团扩散结果, 通过与实际云团扩散的对比, 发现三组仿真数据均接近实测情况, 尤其是云团扩散的整体轮廓及云团气体浓度中心位置均保持一致. 二者的区别在于部分区域的差别, 如仿真的云团扩散相对连续完整且轮廓较为平滑, 而实际云团扩散存在区域不连续性且轮廓不够平滑.

分析仿真的云团扩散与实际云团扩散出现差别的原因, 认为在实际环境中局部风速和风向不是固定的, 造成云团部分位置被吹散, 形成不连续扩散, 云团的总体轮廓也变得不平滑; 而仿真的云团扩散初始条件中假设环境风的风向和风速均为稳定的, 忽略了局部紊乱风场的影响, 因此仿真的结果更接近理想情况下的云团扩散.

3.2.2 实测与仿真的光谱立方体数据识别成像对比

将选取的三组仿真云团扩散场分布数据放入光线追踪器中, 结合一个实测背景数据立方体和云团多层红外光谱计算模型, 分别计算生成各自的云团红外光谱数据立方体. 对实测和仿真数据进行相关的光谱处理及云团气体成分识别工作, 得到识别成像结果如图8所示.

图8(a), (c), (e)为实测数据, 图8(b), (d), (f)为对应的仿真数据. 红色部分指示的是气体被成功识别为氨气的像素单元, 颜色深浅程度指示了该像素单元上沿 z 轴方向的累积气体相对浓度(或称为气体浓度程长积)的大小, 颜色越浅越亮表示气体相对浓度值越大, 反之越小.

分析对比实测数据的识别成像图和对应的实测云团扩散图(图8(a)与图7(a)对应、图8(c)与图7(c)对应、图8(e)与图7(e)对应), 发现实测数据的图像上被识别的像素单元组成的云团形态是非连续完整的, 虽然实测数据识别成像显示的云团扩散与实际云团扩散较为一致, 但是成像显示的云团形态更为离散, 且在部分区域二者差别较大. 分

析对比仿真数据的识别成像图和对应的仿真云团扩散图(图8(b)与图7(b)对应、图8(d)与图7(d)对应、图8(f)与图7(f)对应), 同样存在识别成像结果比云团扩散情况更为离散化的现象. 究其原因,

由于气体识别算法对光谱质量(信噪比)有一定要求, 因而实测和仿真数据中质量较差(信噪比低于识别底线)的光谱未被识别出来, 从而造成云团识别成像结果的离散化.

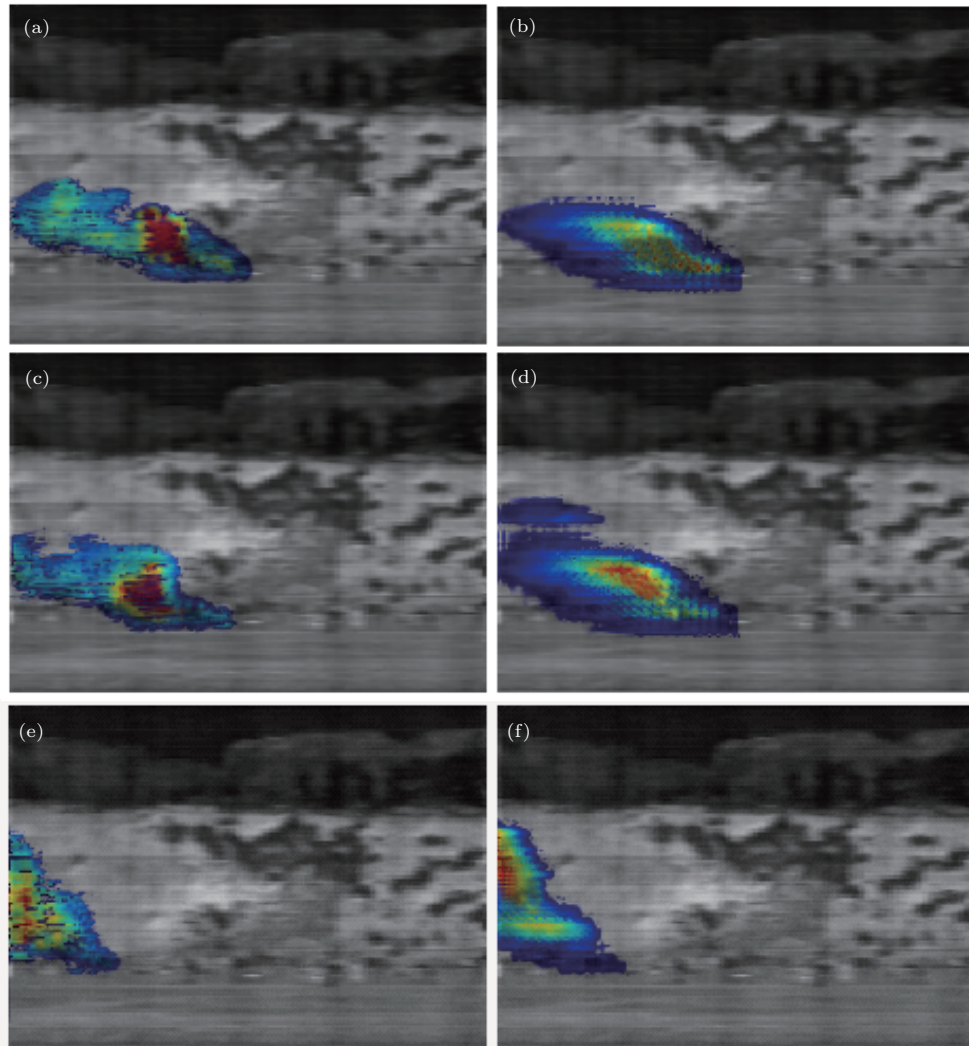


图7 (网刊彩色) 实测云团与仿真云团扩散对比 (a) $t = 11$ s, 实测云团; (b) $t = 11$ s, 仿真云团; (c) $t = 13$ s, 实测云团; (d) $t = 13$ s, 仿真云团; (e) $t = 18$ s, 实测云团; (f) $t = 18$ s, 仿真云团

Fig. 7. (color online) Comparison of measured and simulated cloud diffusion: (a) The measured cloud when $t = 11$ s; (b) the simulated cloud when $t = 11$ s; (c) the measured cloud when $t = 13$ s; (d) the simulated cloud when $t = 13$ s; (e) the measured cloud when $t = 18$ s; (f) the simulated cloud when $t = 18$ s.

进一步对比分析三组实测数据的识别成像结果和对应仿真数据的识别成像结果, 发现三组仿真的结果均接近于实测情况, 尤其是云团扩散的整体形态及云团气体浓度中心位置均保持一致, 但是就各组数据成像图中颜色框所标示的区域对比(图8(a)与图8(b)、图8(c)与图8(d)、图8(e)与图8(f))来看, 受到云团扩散模型偏差的影响, 实测与仿真识别成像结果存在较大差别. 相较于云

团扩散过程中实测与仿真结果的差别(图7(a)与图7(b)、图7(c)与图7(d)、图7(e)与图7(f)), 识别成像中的实测与仿真结果的差别进一步加大. 在相同的气体识别算法处理的情况下, 认为识别成像中实测与仿真结果差别变大的原因在于云团红外光谱仿真模型中的一些仿真近似条件(如三组光谱仿真使用同一组背景数据等)使仿真结果更接近理想情况.

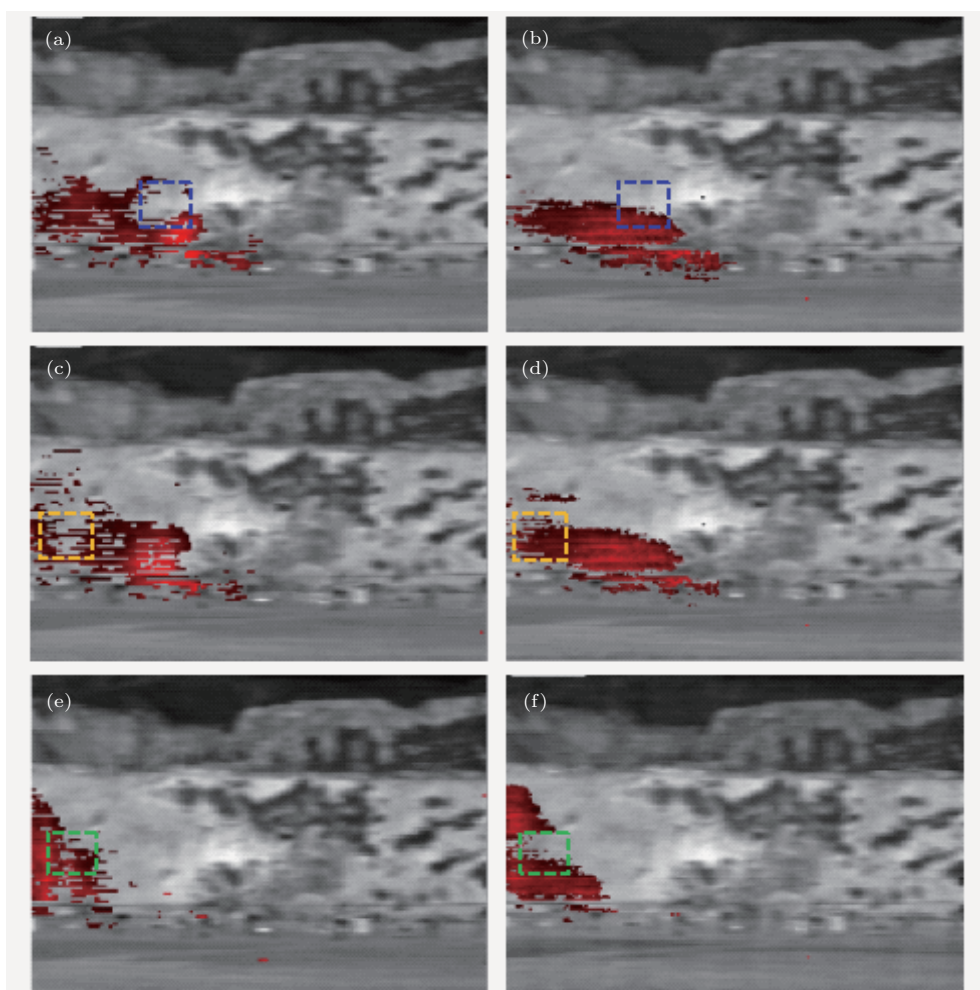


图8 (网刊彩色) 三组实测数据与仿真数据识别成像图 (a) $t = 11$ s, 实测数据; (b) $t = 11$ s, 仿真数据; (c) $t = 13$ s, 实测数据; (d) $t = 13$ s, 仿真数据; (e) $t = 18$ s, 实测数据; (f) $t = 18$ s, 仿真数据

Fig. 8. (color online) Imaging of three groups of measured and simulated data: (a) The measured data when $t = 11$ s; (b) the simulated data when $t = 11$ s; (c) the measured data when $t = 13$ s; (d) the simulated data when $t = 13$ s; (e) the measured data when $t = 18$ s; (f) the simulated data when $t = 18$ s.

3.2.3 实测与仿真的光谱对比

仅从云团扩散和光谱识别成像的角度对比各时刻仿真和实测云团的扩散形态, 只能说明云团扩散形态的仿真准确性, 并不能说明云团红外光谱仿真的准确性, 而仿真准确的红外光谱正是该研究的最终目标. 为了进一步验证仿真的准确性, 需要比较仿真与实测的光谱, 并计算仿真误差.

1) 关键区域的选择

要验证云团红外光谱及其随时间变化情况的正确性, 需要选取一个固定观测点进行观察和评估. 但是, 由于实际的云团扩散受到复杂风速风向的影响, 呈现部分区域不连续性, 而仿真的云团相对连续, 因此, 不宜选择个别像素作为固定观测点, 应该选取具有代表性的关键区域作为固定观测点. 根据云团的实际扩散状态, 选取图9所示关键区域

(以第一组数据识别成像图为例).

选取这三个具有相同像素点数量的固定关键区域的依据如下: 在云团的整个扩散过程中, 各关键区域内云团的变化存在有一定代表性的规律. 在扩散起始区域, 云团的变化是从有到无; 在扩散中部区域, 云团的变化是从无到有并且一直有; 在视场边缘区域, 云团的变化为从无到有. 三个关键区域内的云团变化反映了云团扩散的整体过程, 因此关键区域的选择是合理的.

2) 关键区域光谱仿真相对误差计算

选取关键区域之后, 需要对各组数据在各关键区域内的云团红外光谱进行比较并计算相对误差. 为此, 选取第一组数据作为示例, 说明如何计算关键区域的光谱仿真误差, 如图10所示.

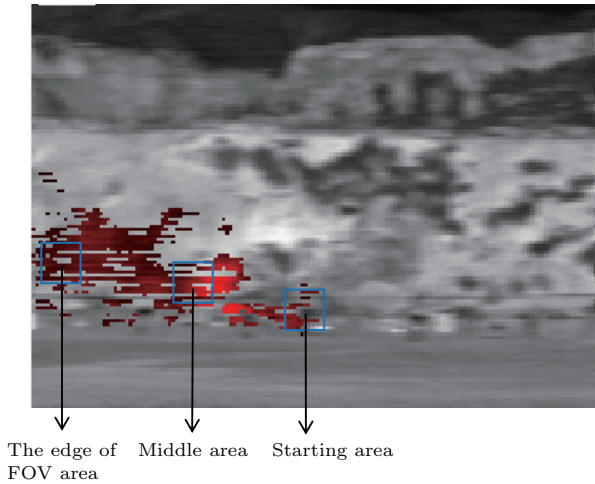


图9 (网刊彩色) 三个关键区域
Fig. 9. (color online) Three key areas.

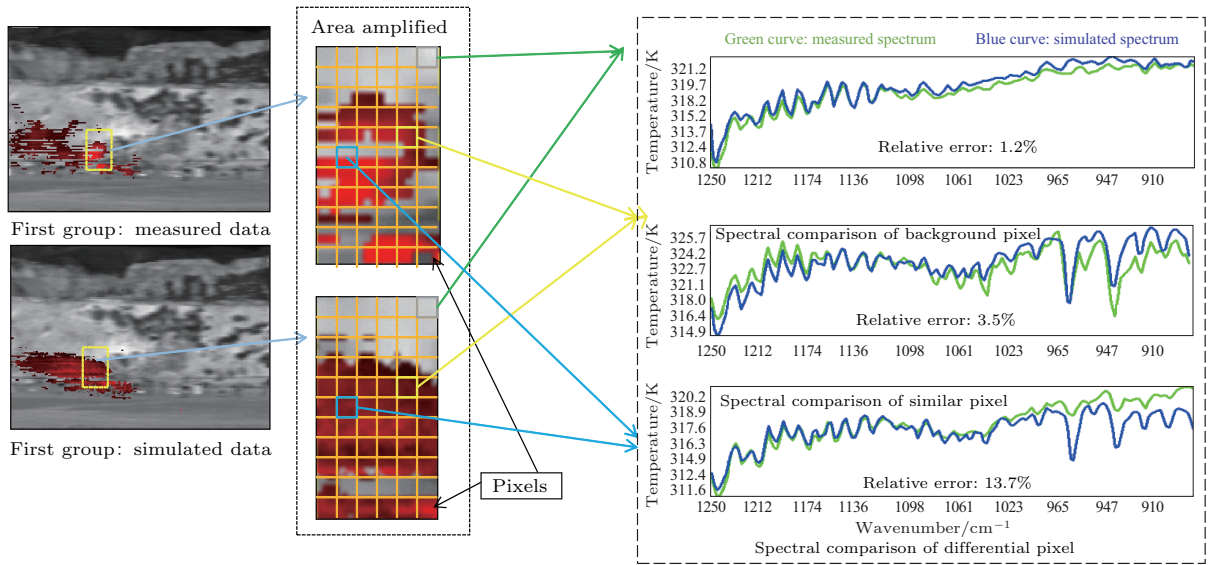


图10 (网刊彩色) 关键区域内光谱比较及误差计算
Fig. 10. (color online) Spectrum comparison and error calculation in key areas.

最后, 对三组数据各关键区域进行相同的光谱误差分析, 得到分析结果, 如表 1 所示.

表1 三组数据平均相对误差
Table 1. Relative errors of data of three groups.

Key area	Relative error/%		
	Group 1	Group 2	Group 3
Starting area	5.7	4.2	4.8
Middle area	7.8	8.5	5.3
FOV edge area	10.5	8.6	9.8

纵观三组对比数据的平均相对误差, 基本保持在10%以下, 其中最大平均相对误差为10.5%, 最小为4.2%, 说明仿真的云团红外光谱数据立方体和实测数据的差异不大, 基本符合实际云团的扩散

所有用作比较的红外光谱均为亮温光谱^[21], 亮温光谱由辐射亮度谱根据普朗克公式反演而来, 比辐射亮度谱更易被识别算法处理. 在计算各关键区域内各像素点仿真光谱与实测光谱的相对误差后, 需要建立一个统一的具有区域代表性意义的量来评估区域光谱仿真的优劣, 为此定义区域平均相对误差, 即

$$R_{\text{area}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{pixel}}(i), \quad (11)$$

式中 R_{area} 为区域平均相对误差; n 为区域内像素点数; $R_{\text{pixel}}(i)$ 为区域内第 i 个像素点的光谱相对误差.

情况及其红外特性.

4 结果与讨论

针对仿真的云团扩散结果及其红外光谱数据立方体, 分别从云团扩散、光谱识别成像和光谱相对误差大小三个角度去验证仿真结果的正确性. 从仿真结果来看, 仿真的云团扩散和实测的云团扩散在整体轮廓上保持一致; 通过计算关键区域内仿真谱和实测谱的平均相对误差, 证实仿真的光谱非常接近实测光谱; 综合来看, 无论是云团整体扩散形态还是局部气体浓度分布, 仿真都达到了一定的精确性, 可以用来补充实测数据以完善相关气体识别

算法.

虽然仿真的云团扩散和实测的云团扩散整体轮廓保持一致,但是在部分区域出现了差异.这种差异是仿真云团扩散时简化了实际环境条件造成的.对于实测云团光谱识别成像结果中呈现的云团非连续现象,去除光谱信噪比的影响后,影响较大的就是复杂的环境因素,比如局部紊乱风场对云团的扰乱作用.仿真云团扩散时假定风速风向在短时间内是不变的,由此造成了仿真的云团扩散比实测的云团扩散更接近理想状态,即受不确定因素干扰最少.

另外,由云团扩散模型引起的偏差直接导致仿真光谱的误差,它与云团红外光谱仿真模型引起的偏差一起决定了仿真光谱的总误差.因此,在将来的研究工作中需要考虑风速风向的变化以优化云团扩散仿真模型,并考虑云团背景的变化等因素以优化云团红外光谱仿真模型,使仿真的云团扩散更符合实际情况,同时使仿真光谱更贴近实际,从而使关键区域的平均相对误差更小,获得更加符合实际情况的云团红外光谱数据立方体.

5 结 论

本文建立了基于物理模型的面阵探测方式下云团红外光谱仿真方法,试图从基础的物理规律出发,辅以正确的面阵探测器下的云团红外光谱仿真模型,对云团的真实扩散过程及其红外光谱数据立方体进行仿真.从仿真结果与实测结果的对比来看,本文方法具有较高的仿真精度,达到了预期效果.本文建立的面阵探测方式下的云团红外光谱仿真方法对于污染气体泄漏的检测与识别具有一定参考价值.

参考文献

[1] Zhang J, Xun Y L 1999 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **16** 438 (in Chinese) [张骏, 旬毓龙 1999 量子

电子学报 **16** 438]
 [2] Zhang J, Jiang F H, Gong Y J, Dai Z H 2001 *Spectrosc. Spect. Anal.* **21** 617 (in Chinese) [张骏, 江飞虹, 宫彦军, 戴振宏 2001 光谱学与光谱分析 **21** 617]
 [3] Xiong W, Fang Y H 2007 *Laser and Infrared* **37** 637 (in Chinese) [熊伟, 方勇华 2007 激光与红外 **37** 637]
 [4] Jiang F H 2009 *Journal of Applied Optics* **30** 687 (in Chinese) [江飞虹 2009 应用光学 **30** 687]
 [5] Nick F, Dimirtis M 1996 *Graphical Models and Image Processing* **58** 471
 [6] Zhou Y X 2006 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [周永霞 2006 博士学位论文 (杭州:浙江大学)]
 [7] Roy W, Brian B 2007 *Proc SPIE* **6738** 67380P
 [8] Yang X D 2013 *M. S. Dissertation* (Hefei: Anhui University) (in Chinese) [杨贤达 2013 硕士学位论文 (合肥:安徽大学)]
 [9] Wang J W, Yang X D 2014 *Computer Technology and Development* **1** 122 (in Chinese) [汪继文, 杨贤达 2014 计算机技术与发展 **1** 122]
 [10] Qu C L 2015 *Nat. Gas Ind.* **35** 105 (in Chinese) [屈长龙 2015 天然气工业 **35** 105]
 [11] Song G 2015 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [宋高 2015 硕士学位论文 (成都:电子科技大学)]
 [12] Zhao H S, Xu Z W, Wu Z S, Feng J, Wu J, Xu B, Xu T, Hu Y L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 209401 (in Chinese) [赵海生, 许正文, 吴振森, 冯杰, 吴健, 徐彬, 徐彤, 胡艳莉 2016 物理学报 **65** 209401]
 [13] Nappo C J 1984 *Atmos. Environ.* **18** 299
 [14] Hooek D W 1991 *Proc. SPIE* **1486** 164
 [15] Didi K J S, Schott C R, Chang Y 2000 *Opt. Eng.* **39** 1047
 [16] Flanigan D F 1986 *Appl. Opt.* **25** 4253
 [17] Sidi N, Steven E G, Vinay K I, Dimistris G M 2013 *Proc. SPIE* **8743** 874316
 [18] James K T, Brian P V H 1984 *Computer Graphics* **18** 165
 [19] Wang H, Wang X, Liu L, Long T, Wu Z M 2015 *Proc. SPIE* **9812** 98121E
 [20] Wang C, Xie Z, Gao J, Yao T T 2016 *Journal of Software* **1** 136 (in Chinese) [王驰, 谢昭, 高隽, 姚婷婷 2016 软件学报 **1** 136]
 [21] Liu J X, Fang Y H, Cui F X, Wu J 2015 *Infrared Laser Eng.* **11** 3469

Simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting*

Wang An-Jing¹⁾²⁾ Fang Yong-Hua^{1)†} Li Da-Cheng¹⁾ Cui Fang-Xiao¹⁾ Wu Jun¹⁾
Liu Jia-Xiang¹⁾ Li Yang-Yu¹⁾ Zhao Yan-Dong¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2) (Science Island Branch, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 16 December 2016; revised manuscript received 21 February 2017)

Abstract

The research on simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra is very important for studying the spectral identification algorithms by using simulated spectra. Some good results of the simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under single-detector detecting are achieved, and have been used for studying the spectral identification. With the development of infrared detection technology, the infrared imaging spectrometer is used to detect pollutant gas cloud. The gas identification algorithms in the way of plane-array detection based on the imaging spectrometer also need a number of measured gas-cloud infrared spectrum data cubes. Due to the lack of measured data in studying the spectral identification algorithm that is based on imaging spectrometer, the multiple-layer model of the cloud infrared spectrum is well studied by using the high-precision physics-based gas-cloud explosion model and its gridding simulation results, and the way of simulating pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array-detector detecting is proposed to generate the infrared spectrum data cube with both spectral and spatial information, which obtains a new research method for the research field. Validations are made by comparing the measured data with the simulated data, and the comparison contains three parts: i) the comparison of measured gas-cloud explosion with simulated gas-cloud explosion, ii) the comparison of spectral identification imaging results between the measured and the simulated gas-cloud infrared spectrum data cubes, and iii) the comparison between the measured and the simulated gas-cloud infrared spectra. The comparison results have two aspects: the first aspect is that the simulated gas-cloud explosion is consistent with the measured explosion and has little difference in separate parts, and the second aspect is that the simulated gas-cloud spectra have relative errors of less than 10% compared with the measured gas-cloud spectra. The conclusion is that the simulation model of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting is correct, which is obtained from the validation results that simulated gas-cloud infrared spectrum data cubes are highly precise, whether in the comparison with spectral identification imaging results or in the comparison with gas-cloud spectra. The simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting which directly reflects the explosion of pollutant gas cloud and provides complete and realistic infrared spectrum data cube of pollutant gas cloud, is significant for improving and perfecting the spectral identification algorithms.

Keywords: infrared spectra, pollutant gas cloud explosion, plane-array detecting, ray tracing

PACS: 42.30.-d, 51.10.+y, 68.43.-h, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.66.114203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41505020).

† Corresponding author. E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn