

对流层污染测量仪(MOPITT)原理及其应用

The principles and application of the Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT)

马立杰^{1,2}, 黄海军¹, 龚建明³, 崔迎春^{1,2,4,5}, 张志^{1,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 5. 国家海洋局 海洋沉积与环境重点实验室, 山东 青岛 266061)

中图分类号: P171.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2006)02-0081-04

1 对流层污染测量仪(MOPITT)概况

MOPITT (the Measurement of Pollution in the Troposphere) 测量仪搭载在美国地球观测计划(EOS) Terra 卫星上, 该卫星于 1999 年 12 月 18 日成功发射。Terra 卫星采用高度为 705 km, 太阳同步轨道, 地方时上午 10:30 通过赤道, 3 d 对整个地球观测一遍。根据气体相关放射性测量学原理, MOPITT 测量对流层的 CO 浓度(体积混合率)和总柱 CO 和 CH₄ 含量(卫星与地球之间一个大气柱里单位面积分子总数)。MOPITT 是第一个全面测量全球 CO 和 CH₄ 浓度的时间和空间变化的仪器, 空间分辨率是 22 km × 22 km。

MOPITT 测量仪采用最低视点, 对垂直于卫星轨迹方向的地面进行横向扫描, 测量 3 个波长的光谱。一个是来自太阳和地表的 4.7 μm 的太阳辐射和地面热辐射测量通道, 用来探测 CO 在对流层中的垂直分布情况, 另外两个是短波太阳辐射通道 2.3 μm 和 2.2 μm, 用来探测对流层中总柱 CO 和 CH₄ 的含量。测量要求 CO 含量垂直剖面 and 总柱 CO 含量精度达到 10%, 总柱 CH₄ 含量精度达到 1%。

2 对流层污染测量仪工作原理

MOPITT 测量仪应用相关气体光谱学原理测量 CO 和 CH₄ 的含量。基本技术如下^[1-8]: 光电管里装有目标气体的样本, 单色光辐射从气体光电管的左侧进入, 经气体光电管传输函数过滤, 把将要测量的目标气体辐射的电磁波过滤出来, 过滤后的辐射进入探测器并转换成电信号, 该电信号进入处理器(由于微量气体浓度相对比较低, 所以测量系统必须使来自 CO 和 CH₄ 的信号最大化, 使来自其它气体的信号最小化, 所以输出之前要经电子同步放大器放大), 最后输出。

MOPITT 测量仪内安装了 2 种类型的相关气体

辐射计^[6]: 压力调节辐射计(PMR)——调节光电管里气体的压力; 长度调节辐射计(LMR)——通过调节有效光电管的长度改变光电管里气体的数量。对于 PMR, 每个光电管的长度相同, 但压力变化; 对于 LMR, 压力是常数, 气体光电管有效长度发生变化。相对于对流层下层和上层, 高压力光电管的 LMR 通道仪器灵敏度达到最优; 而相对于对流层上层, 低压力光电管的 PMR 通道仪器灵敏度达到最优。因此, 用 PMR 来测量上层大气中 CO 浓度, 而用 LMR 来测量对流层下层 CO 浓度。MOPITT 共有 8 个通道, 6 个相关气体光电管, 其中 2 个 PMR 和 2 个 LMR 用来测量 CO 浓度, 2 个 LMR 分别用来测量总柱 CO 和 CH₄ 含量。测量的同时, 两种类型的信号被记录下来: 差值信号(D)和平均信号(A)。D 是一个调节周期内的平均信号变化, 本质上是大、小光电管光学深度之间信号的差值; A 是一个调节周期内信号的平均值, 它给出了光电管的平均辐射传播。D 信号一般包括大气中目标气体 CO 或 CH₄ 的贡献, A 信号主要代表了背景辐射(包括目标气体的贡献)。对于 LMR 通道, 通过改变光电管光学长度(2 mm 和 10 mm)定义 2 种状态; 而对于 PMR 通道, 通过改变光电管压力(高压和低压)来定义 2 种状态。

图 1 给出了吸收光电管里装有 2 种不同数量气体, 作为光谱频率函数输出信号的情况。对于压力调节辐射计和长度调节辐射计, 在相关气体吸收光谱线宽度范围内, 光电管光学深度或压力在 2 种状态之间调节过程中, 循环吸收光电管里气体的数量, 伴随着每个调节循环, 探测器将有选择地过滤 2 种不同的辐

收稿日期: 2004-06-11; 修回日期: 2005-02-10

基金项目: 中国科学院创新项目(KJ CX3-SW-219)

作者简介: 马立杰(1976-), 女, 山东莒南人, 博士生, 主要从事遥感与地理信息系统研究, 电话: 0532-82898531, E-mail: malijie@ms.qdio.ac.cn

射,同时产生2种相应不同的信号。光学滤波器取代气体光电管和它的调制器时,输出信号差异与这两种信号的差异相同。通过有效差值传输(EDT)(图1b),阐述了过滤波剖面情况。EDT是低压力气体光电管(图1a中 (μ_l))和高压力气体光电管(图1a中 (μ_h))系统传输的差值。EAT是低压力气体光电管(图1a中 (μ_l))和高压力气体光电管(图1a中 (μ_h))系统传输的平均值。图1c说明了相关气体原理在识别与目标气体光谱线没有关系的干涉光谱线时的优势。中间光谱线与光电管里气体光谱线没有关系,与EDT传输里的最小值一致。

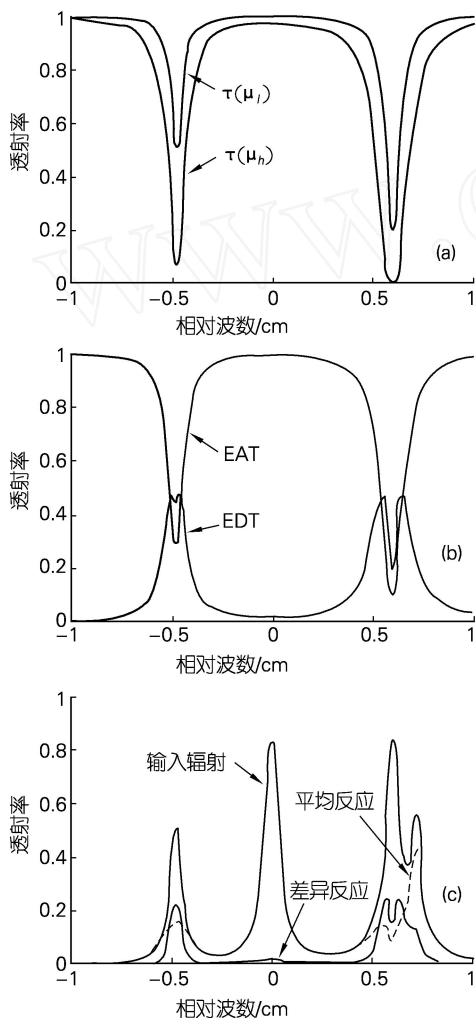


图1 相关气体光谱仪在谱空间的运转(据 Jinxue Wang 等, 1999 a 和 1999 b)

3 总柱 CH₄ 含量反演

3.1 反演算法

反演总柱 CH₄ 含量输入数据包括辐射数据、现场测量数据和一些辅助性数据。其中,辐射数据包括估算的辐射误差和实际测量的辐射值。现场测量数据包括现场测量的 CH₄ 浓度剖面线和总柱 CH₄ 含量统计变化。辅助性数据包括温度、压力和辐射系数等表面参数和大气剖面线信息(温度、水蒸气剖面线)。反演模型采用快速辐射传输模型(MOPFAS),它是一种前向辐射传输模型^[9]。反演算法建立在最大似然原理基础上^[10],算法中最关键的参数 MOPITT 信号的理论值,使用快速辐射传输模型来计算^[9,11],将 $R_{D/A}$ (D 和 A 的比率)作为反演总柱 CH₄ 含量的测量值。反演公式为:

$$x_{n+1} = x_0 + \left[\frac{c_x k_n}{c_x k_n^2 + c_R} \right] [R^{OBS} - R^T(x_n) - k_n(x_0 - x_n)],$$

在文献[9]中有关于公式的详细介绍,在此不再详述。

3.2 反演影响因素

3.2.1 CH₄ 以外其它气体成分的影响

太阳辐射 2.2 μm 的短波通道有一个宽的滤波带,4360~4500 cm^{-1} 覆盖了几个波段,这是个相对比较“洁净”的通道,其它气体(H₂O, CO₂, N₂O)对其干扰很弱,而且这种干扰改变 D 信号只有大约 5%。由于是通过 D/A 信号比来反演总柱 CH₄ 含量的,所以应更加关注由于吸收其它气体而引起的这个比率的变化,不过这种干扰成分影响相对较小^[3]。

3.2.2 地表信息的影响

对于测量 CH₄ 的通道, A 信号由太阳辐射强度和地表反射系数有效地确定。而除了太阳辐射强度和地表反射系数外, D 信号对 CH₄ 吸收很灵敏,同时又因为地表反射系数对总柱 CH₄ 含量变化的影响可以忽略。David 等^[3]研究 8×10^3 Pa 深度的 LMR 测量总柱 CH₄ 含量时发现,地表信息影响目标气体的体积混合率变化仅为 0.6%,所以用信号比 $R_{D/A}$ 来反演总柱 CH₄ 含量,主要依靠大气参数。对于太阳辐射波段通道,由于使用了比值 $R_{D/A}$ 来反演总柱 CH₄ 含量,所以极大地缩减了未知的因素和因高度变化而引起的地表反射系数作用的程度。

4 讨论

设计 MOPITT 的最初目的是提供 CO 和 CH₄ 全球分布情况的第一手详细信息,即它们水平的和垂直的(对于 CO)时间和空间变化,以及与其它活动的关系,如生物燃烧量、工业活动和边缘层雷雨爆发等。

测量结果不仅可以用来勾划全球 CO 和 CH₄ 浓度分布情况,而且也可用在 3D 模型上,用来研究对流层的化学作用和动力学过程^[1]。除此之外,作者认为将 MOPITT 用在探测海域油气或天然气水合物藏远景区上是一次很好的尝试,可行性分析如下:

4.1 海表面甲烷气含量

据报道,世界上 85% 的油气田存在油气微渗漏。利用卫星热红外增温异常探测油气藏的理论^[12-17] 基础正是微渗漏。实践中,黄福林等^[16] 在中国东部及其近海,定点、长期、同步对低层大气进行了观测,发现在中强地震临震前距震中约 250 km 范围内,在已知油气区低层大气中 CH₄ 含量高出平均值 2 倍多,并在卫星热红外图片上同步出现增温幅度为 1~6 的异常。2002 年 8 月 10~21 日,进行 100 万南海黄海区地质调查的同时,进行了低层大气现场甲烷气浓度测量,分析测量数据可以看到,油气田潜力区甲烷气含量明显比周围地区甲烷气含量高(图 2)。再加上遥感监测周期长,它有能力捕捉到突发性事件的痕迹,更重要的一点是,由于天然气水合物是在低温、高压下形成的亚稳态物质,细微环境因素的改变均会引起其分解,这使得利用 MOPITT 探测海域油气或天然气水合物远景区成为可能。

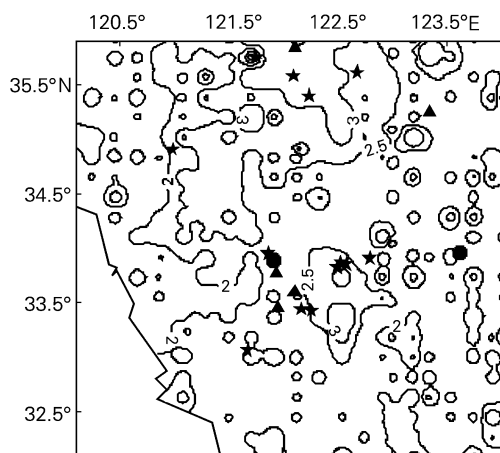


图 2 南海低层大气 CH₄ 浓度等值线
单位: $\times 10^{-6}$; 一油气显示井; 一油井; 一干井

4.2 MOPITT 试验

受地形、对流和风的影响,气体自地球边界层向高层大气上升过程中,发生对流和平流。MOPITT 探测到的 CH₄ 含量能否与低层大气中的甲烷气分布情况对应起来成为一个问题。为了解决这个问题,

2001 年 1 月 2~27 日,Edwards 等^[18] 从 700 hPa 大气层开始进行全球平均 CO 浓度测量,结果发现北半球 Savanna 地区发出的烟雾在自由对流层被观测到。尽管观测位置与火点位置有些距离,但是,在 700 hPa 高空层,烟雾形成的高浓度 CO 区域北边界与火灾发生地区形成的烟雾范围能合情合理地相互联系起来。

4.3 MOPITT 对不同大气层的灵敏度

在短波太阳辐射通道里,A 信号由太阳辐射强度和表面反射系数有效地确定。D 信号对大气中 CO 或 CH₄ 的吸收与太阳辐射强度和表面反射系数一样灵敏。图 3 显示了几种相关气体光电管压力下短波段信号函数。因为太阳辐射通道信号函数峰值出现在近地表,所以太阳辐射波段测量包含了更多近地表附近大气的信息。Wang 等^[5] 研究表明,测量 CO 的 5 通道对以 3 km 为中心的大气层 CO 变化最灵敏。McMillan 等^[19,20] 反演对流层总柱 CO 含量发现,大约 70% 的灵敏度来自边界层,对流层的剩余部分仅占 30%。另外,通过长期的工作发现,五级地震引起的油气泄漏能够影响的高度可达到 5 km(强祖基,个人交流)。因此,尽管 MOPITT 对第一层(0~2 km)不太灵敏^[4],气体传输过程中发生了对流和平流,但是,MOPITT 测量仪探测到的总柱 CH₄ 含量在极大程度上能够代表该地区近地表大气分布的真实情况,进而圈定海域油气田或天然气水合物的分布范围。

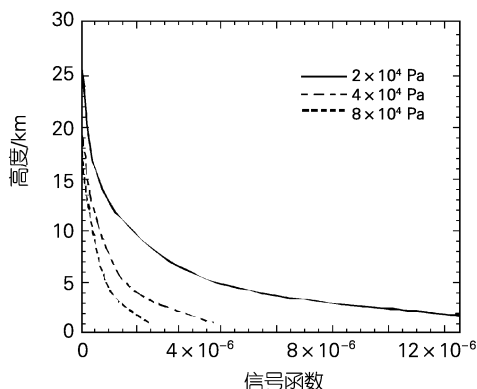


图 3 2.3 μm 波段 3 种 LMR 压力情况下信号函数(据 Pan Liwen 等, 1995)

5 结论

根据气体相关放射性测量学原理,MOPITT 探测对流层中 CO 浓度、总柱 CO 和 CH₄ 含量。通过靶

区海表面甲烷气含量异常、MOPITT 试验和 MOPITT 对不同大气层的灵敏度三方面的分析,可以得出利用 MOPITT 探测海域油气或天然气水合物藏远景区是切实可行的。

参考文献:

- [1] Drummond J R, Bailey P L, Brasseur G, *et al.* Early mission planning for the MOPITT instrument [J]. **Proc SPIE**, 1999, 3756: 396-402.
- [2] Gille J C, Drummond J R, Jinxun Wang, *et al.* The EOS MOPITT experiment: Extracting the information from the measurements [J]. **Proc SPIE**, 1999, 3756: 403-408.
- [3] David L P, Edwards D P, Gille J C, *et al.* Satellite remote sensing of tropospheric CO and CH₄: forward model studies of the MOPITT instrument [J]. **Applied Optics**, 1995, **34**(30): 6 976-6 988.
- [4] Wang Jinxue, Gille J C, Bailey P L. Instrument sensitivity and error analysis for the remote sensing of Tropospheric carbon Monoxide by MOPITT [J]. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 1999 a, 16: 465-474.
- [5] Wang Jinxue, Gille J C, Bailey P L, *et al.* Retrieval of tropospheric carbon monoxide profiles from High-resolution interferometer observations: a new digital gas correlation (DGC) method and applications [J]. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 1999 b, 56: 219-232.
- [6] Wang Jinxue, Gille J C, Revercomb H E, *et al.* Validation study of the MOPITT retrieval algorithm: carbon monoxide retrieval from IMG observations during WINCE [J]. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 2000, 17: 1 285-1 295.
- [7] Taylor F W. Spectroscopic Techniques [M]. New York: Academic Press Inc., 1983. 137-197.
- [8] Drummond J R. Novel correlation radiometer: The length-modulated radiometer [J]. **Appl Opt**, 1989, 28: 2 451-2 452.
- [9] Deeter M N, Wang Jinxue, Gille J C, *et al.* Retrieval of tropospheric methane from MOPITT measurements: algorithm description and simulations [R]. **MOPITT Papers at the SPIE 44th Annual Meeting**, 1999.
- [10] Rodgers C D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation [J]. **Reviews of Geophys and Space Phys**, 1976, 14: 609-624.
- [11] Edwards D P, Halvorson C M, Gille J C. Radiative transfer modeling for the EOS Terra satellite Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) instrument [J]. **J Geophys Res**, 1999, 104: 16755.
- [12] 强祖基, 孔令昌, 郭满红, 等. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. **地震学报**, 1997, **19**(2): 197-201.
- [13] 强祖基, 侯常恭, 黄福林, 等. 寻找油气富集带的遥感找矿新方法——卫星热红外探测技术[J]. **科学通报**, 1994, **39**(18): 1 725-1 726.
- [14] 徐秀登, 徐向民, 马升灯, 等. 临震大气增温异常成因的初步认识[J]. **地震学报**, 1995, **17**(1): 123-127.
- [15] 郭德方. 遥感技术直接找油理论基础及其实践[J]. **环境遥感**, 1995, **10**(1): 45-51.
- [16] 黄福林, 张训华, 夏响华, 等. 中国东部和海域低层大气甲烷及其同系物分布[J]. **科学通报**, 1998, **43**(16): 1 767-1 771.
- [17] 卢振权, 强祖基, 吴必豪. 利用卫星热红外遥感探测南海天然气水合物[J]. **地质学报**, 2002, **76**(1): 100-105.
- [18] Edwards D P, Lamarque J F, Attié L, *et al.* Tropospheric Ozone Over the tropical Atlantic: A satellite perspective [J]. **Journal of Geophysical Research**, 2003, **108**(D8): 4 237-4 257.
- [19] McMillan W W, He H, Doddridge B G, *et al.* Validation of carbon monoxide retrievals from up-looking FTIR atmospheric thermal emission spectral [J]. **Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Optical Society of America Technical Digest**, 1999, 163-165.
- [20] Hui He, McMillan W W, Knuteson R O, *et al.* Tropospheric carbon monoxide column density retrieval during the Pre-launch MOPITT Validation Exercise [J]. **Atmospheric Environment**, 2001, 35: 509-514.

(本文编辑:张培新)