

从红外太阳透过率反演大气可降水量的研究*

陈洪滨 吴北婴 章文星 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 从红外波段太阳透过率测量中可以反演大气可降水量 W 。我们在近、中红外波段选取了三对波长, 用 LOWTRAN 7 辐射传输模式, 主要研究了散射和气溶胶对这三对波长反演 W 算式的影响。结果表明, 通常采用近红外波长对 (即 $0.9422 \sim 0.862 \mu\text{m}$) 反演 W 并非最佳选择, 因为其反演算式受到大气状态 (混浊度) 的很大影响; 而在稍远段两对波长 ($1.47 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 和 $3.704 \sim 3.067 \mu\text{m}$) 对应的算式较为稳定。

关键词 红外太阳透射率 大气可降水量 反演算式

1 引言

早在 1912 年 Fowle^[1]就首先提出, 从红外 $1.13 \mu\text{m}$ 和 $1.47 \mu\text{m}$ 太阳透过率测量中可以推导出大气可降水量 W 。曾庆存^[2]在他的著作中从数学上十分清楚地论述了从单波长或双波长太阳辐射测量中遥感 W 的原理。这种测量大气可降水量的方法被许多研究者采用, 并在实际观测中不断地改进和发展^[3~9]。在多数这类工作中, 仅选择了近红外中的一对波长, 即 $0.942 \sim 0.862 \mu\text{m}$, 而且没有详细研究气溶胶和散射对采用这一波长对测量 W 的影响。

本文将对用红外双波长差分反演大气可降水量 W 的方法进行更深入的研究, 主要目的在于选择最佳波长对, 并发展其反演算式。我们在近、中红外波段选取三对波长, 用 LOWTRAN7 辐射传输模式^[10]计算三波长对的辐射量比, 由最小二乘法建立大气可降水量与辐射量之间的关系式, 并研究散射和气溶胶对这些关系式 (即反演算式) 的影响。

2 波长对选取

利用双波长差分吸收进行水汽柱总量反演时, 其波长对的选取原则是: 两波长处的水汽吸收截面之差要相对的大, 但两波长又要尽可能靠近, 以便消除其他影响 (分子和气溶胶散射、 CO_2 和 O_3 的吸收、太阳光谱的相对变化等等)。

引言中已经提到, 以前大多数研究者选取的波长对是 $0.942 \mu\text{m}$ (强水汽吸收) 和 $0.862 \mu\text{m}$ (弱吸收)。选取这一波长对的原因可能是, 可采用简单而又经济的太阳光谱仪进行测量^[4]。但根据波长对选择原则, 这一波长对似乎并不是最佳的。图 1 给出由

1995-06-21 收到, 1995-08-15 收到修改稿

* 本文获得国家自然科学基金和博士后专项基金联合资助

LOWTRAN 7 计算的大气透过率随波长的变化曲线。由图可见, 虽然其他气体 (CO_2 和 O_3 等) 的吸收作用在两波长处相差不多, 但气溶胶的影响不相当, 而且对于不同类型气溶胶对两波长的相对影响也不固定。

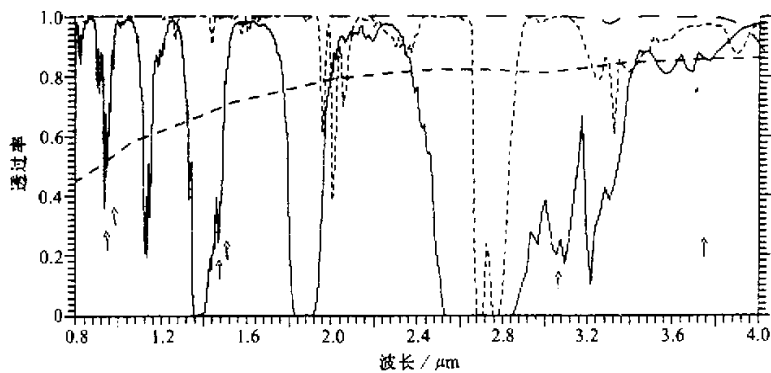


图 1 1976 年美国标准大气红外透过率谱, 图中垂直箭点指示所选的波长
——水汽, ----气溶胶, CO_2 , ——臭氧加氮气

在较早的研究中也使用了位于 $1.13\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 的两个水汽吸收波段。我们选择 $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 这一波长对。在中红外段我们还选取一对波长: $3.704\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.067\text{ }\mu\text{m}$ 。从气溶胶透过率方面来看 (图 1), 这两对波长比第一对的要好, 因为其值较大且较平坦。

我们用 LOWTRAN 7, 在美国标准大气中计算了太阳天顶角 (θ) 为 45° 时这三对 (6 个) 波长处的三种辐射量。三对波长的带宽波数都取为 20 cm^{-1} , 这是 LOWTRAN 7 的谱分辨率 (我们正设计的光谱仪其谱分辨率要高得多)。在计算散射和热辐射量时, 仪器视场角取 2° 。计算结果在表 1 中给出。比较表中各波长处的总辐射量可见, 第一对波长处的总辐射量之差要小; 第二和第三对两波长处的信号有很大差别。比较散射辐射量显示, 在第一对波长处散射辐射仍有一定的贡献 (大于 10%); 当气溶胶更多时, 散射贡献还要大。大气红外热辐射, 对第一和第二对波长的信号没什么贡献, 对中红外远处的第三对波长的贡献也很小。

表 1 三个波长对处的红外辐射量 (总辐射量 = 透射量 + 散射量 + 热辐射量)

波 长 / μm	总辐射量 / [10 W / m]	透射量 / %	散射量 / %	热辐射 / %
0.9422	5.917	86.6	13.4	
0.873	3.779	88.4	11.6	
1.47	10.42	94.9	5.1	
1.55	1.780	94.3	5.7	
3.704	2.217	97.1	2.45	0.45
3.067	0.5417	99.6	0.2	0.2

3 从太阳辐射测量反演 W 的算式

设地面测量的双波长太阳辐射量(或其电压输出)之比为 $T_r = I_{\lambda_1} / I_{\lambda_2}$, 其中 λ_1 和 λ_2 分别为水汽强吸收和弱吸收波长。根据 Bartels^[8], 大气可降水量 W 与 T_r 之间普遍公认的关系式为

$$W = \frac{1}{am} \left[\ln \left(\frac{1}{bT_r} \right) \right]^n$$

式中 a 、 b 为常数, 取决于水汽吸收和仪器特性, 且通常由探空或微波辐射计的资料回归拟合获得(即定标); m 是大气质量, 通常等于 $1/\cos\theta$; n 是回归常数。对于波长对 $0.942 \sim 0.862 \mu\text{m}$, 不同作者得到的 n 值差别很大。Gates 和 Harrop^[3]以及 Volz^[4]认为 n 为 2; 而 Pitts 等人的工作显示 $n=1.78$ 能更好地拟合实测资料^[5]。Bartels^[8]发现, n 从 1.2 变到 25 都能得到很好的回归结果。他认为, 除(1)式外还有其他数学形式也能给出好的拟合, 例如多项式表达式^[6]; 每次这类测量的精确度主要受到大气状态的限制。孔琴心和任丽新^[7]用探空所得的总水汽量与红外直接辐射测量值作拟合, 认为 n 值取 2 比 1.78 稍好一点。Thome 等人较近的工作中虽然使用了较精确且简单的吸收带模式, 但他们用修正的 Langley 技术确定的零大气质量电压信号(对应于大气顶的太阳辐射量)随日期变化很大^[9]。他们认为主要是仪器响应变化造成的。综上所述, 在 $0.942 \sim 0.862 \mu\text{m}$ 波长对要给出确定的 W 与 T_r 之间的关系是很困难的, 由此带来反演大气可降水量的很大不确定性。

我们选用北京 1993 年的 100 份探空资料, 用 LOWTRAN 7 计算了三对波长处的红外辐射量, 进而研究散射辐射贡献和气溶胶对 $W-\ln(1/T_r)$ 拟合关系的影响。

3.1 散射辐射的影响

图 2 是 W 相对于 $\ln(1/T_r)$ 的散点图(这里 b 取为 1), 图中两种不同符号分别表

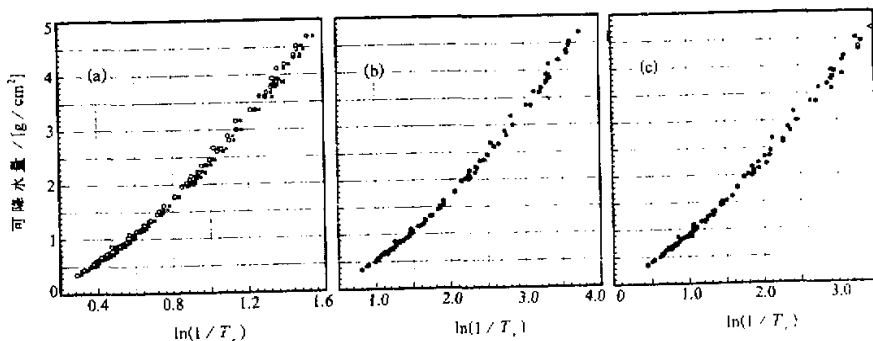


图 2 大气可降水量相对于 $\ln(1/T_r)$ 的散点图, 太阳天顶角为 45°

符号“o”总辐射量; “x”净太阳透射

示太阳透射辐射比和总辐射比 (总辐射 = 透射 + 散射 + 热辐射)。两组数据的拟合得到的有关回归参数列在表 2 中。由图 2 可见, 在三对波长中的第一对有散射影响, 用此波长对的总辐射比估算 W 将系统性地偏小, 在冬季低 W 时, 平均低估 5% 以上, 在夏季高 W 时, 约低估 2% ~ 3%。在较长的两对波长, 其散射和热辐射的影响不大, 两组数据得到的拟合关系相近。

表 2 $W - \ln(1/T_r)$ 拟合关系的有关参数*

波长对	a	n	相关系数	标准差
1	0.29941	1.587023	0.9995	0.0426
	0.28659	1.541444	0.9995	0.0416
2	1.3201	1.660158	0.9993	0.0493
	1.3078	1.654301	0.9993	0.0489
3	0.75621	1.289970	0.9985	0.0728
	0.75663	1.281241	0.9985	0.0705

* 每对波长分别对总辐射和净透射有两个关系式

比较三对波长拟合关系的 n 值表明, n 值取决于波长对的位置。第一和第二波长对的 n 值大, 但仍未达到 Pitts 等人给出的值 1.78^[5]; 最长波长对的 n 值接近于 Bartels 文中的小值 1.2^[6]。

要注意的是, 图 2 (a) 与 2 (b) 和 2 (c) 相比其横轴范围要小。一方面, 这造成了第一波长对处回归关系稍高的相关系数和较小的均方根差 (见表 2); 另一方面, 对应于相同的 W 变化, 第一波长对的信号变化动态范围要小得多, 这样, 在此波长对, 仪器较小的测量误差可能产生 W 估计较大的误差。

3.2 气溶胶的影响

用 LOWTRAN 7 中的城市气溶胶模式, 我们计算了气象视距 V 为 2、4、5、8 和 16 km 时三对波长的辐射比 T_r , 进而得到 $W - \ln(1/T_r)$ 的拟合公式。参数 a 和 n 随 V 变化的关系曲线在图 3 中给出。由图可见, 对于最短的第一波长对, 无论是参数 a 还是 n 随 V 值都变化很大; 而对另外两个波长对, 变化则要相对平缓得多。这说明, 第一波长对的 $W - \ln(1/T_r)$ 关系对气溶胶 (即大气混浊度) 很敏感。这对于从太阳透射测量中反演大气可降水量是不利的。如采用第三个波长测量气溶胶光学厚度 τ_a 似乎仍不能消除气溶胶的影响, 因为在近红外段 τ_a 随波长的变化关系比较复杂, 将第三波长所测 τ_a 很难精确地外推给出测水汽波长上的 τ_a 。另外由图还可见, 第一波长对的 n (或 a) 值随 V 的变化趋势与第二、第三对的不一样; 在十分晴朗大气中, n (或 a) 值趋于一渐近值。

Bird 和 Hulstrom^[6]的工作表明, $W - \ln(1/T_r)$ 关系还与波长对的带宽有关。我们的计算表明: 当带宽波数小于某一直时 (对三对波长对都约在 160 cm^{-1}), n 值变化不大; 带宽更宽时, n 先急剧增大 (可大于 2), 然后又有缓慢的变化。

4 结论

(1) 根据 LOWTRAN 7 辐射模式的计算, 进一步证实了 W 与 $\ln(1/T_r)$ 间的系

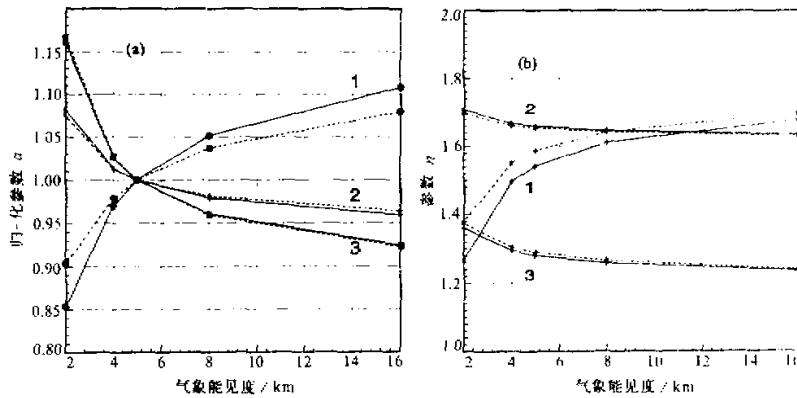


图3 $W-\ln(1/T_r)$ 关系中的参数 a (图a)和 n (图b)随气象能见度 V 的变化

虚线是双波长总辐射比; 实线是透射比。参数 a 在能见度为5 km处归1

指数关系(即方程(1))。

(2) 散射对通常用的近红外波长对($0.942\sim 0.862\mu\text{m}$)有一定影响, 尤其是当大气混浊度大时。通过测量偏离太阳方向 $3^\circ\sim 5^\circ$ 的散射辐射, 可以从总辐射中消除部分散射贡献。在此波长对, 辐射比值的动态范围较小。

(3) 第一波长对的 $W-\ln(1/T_r)$ 关系对气溶胶比较敏感, 即随大气状态特性变化很大。因此, 从上述两点看, 此波长对用于反演大气可降水量并不很理想。

(4) 大气散射和热辐射对较长波长对影响小, 其 $W-\ln(1/T_r)$ 关系比较稳定, 即受大气状态影响较小。

(5) 由于第三对波长受到 CO_2 的一点影响, 所以第二对波长反演 W 较为理想。

本工作主要是从理论上研究了从红外太阳透射率测量中反演大气可降水量的一些问题。在我们的紫外—可见光—红外光谱仪安装调试成功后, 将做进一步的实际测量工作。

参 考 文 献

- 1 Fowle, F.E., 1912, The spectroscopic determination of aqueous vapor. *Astrophys. J.*, **35**, 149~162.
- 2 曾庆存, 1974, 大气红外遥测原理, 北京: 科学出版社, 178~180.
- 3 Gates, D.M. and W.J. Harrop, 1963, Infrared transmission of the atmosphere to solar radiation, *Appl. Opt.*, **2**, 887~898.
- 4 Volz, F.E., 1974, Economical multispectral sun photometer for measurements of aerosol extinction from $0.44\mu\text{m}$ to $1.6\mu\text{m}$ and precipitable water. *Appl. Opt.*, **13**, 1732~1733.
- 5 Pitts, D.E. et al., 1977, Temporal variations in atmospheric water vapor and aerosol optical depth determined by remote sensing. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1312~1321.
- 6 Brd, R.E. and R.L. Hulstrom, 1982, Precipitable water measurements with sun photometers. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1196~1201.
- 7 孔琴心、任丽新, 1983, 由太阳近红外直接辐射强度遥测大气总降水量. *大气科学*, **7**, 341~346.

- 8 Bartels, R.A., 1986, Comments on Precipitable water measurements with sun photometers, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1788 ~ 1790.
- 9 Thome, K.J., B.M. Herman, and J.A. Reagan, 1992, Determination of precipitable water from solar transmission, *J. Appl. Meteor.*, **31**, 157 ~ 165.
- 10 Kneizys, F.X. et al., 1989, Atmospheric Transmission / Radiance: The LOWTRAN 7 Model. AFGL Report

A Study of Determining Precipitable Water from Solar Infrared Transmission

Chen Hongbin, Wu Beiyong, Zhang Wenxing and Lu Daren

(LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The precipitable water can be derived from the measurements of solar infrared transmission. Using the LOWTRAN 7 radiative transfer model, the effects of multiple scattering and atmospheric aerosols are investigated on the retrieval algorithm for three pairs of wavelengths in the infrared region. It is shown that: (a) the common use of the pair $0.942 \sim 0.862 \mu\text{m}$ is not optimal for determining precipitable water because the related retrieval algorithm is influenced greatly by the atmospheric turbidity; and (b) the other two pairs chosen by us in the middle infrared region are more suitable for the purpose because of the better stability of their algorithms.

Key words solar infrared transmission precipitable water retrieval algorithm

《中国科学引文索引》(印刷版) 正式出版

以中国科学引文数据库为基础的《中国科学引文索引》(印刷版), 在该刊编辑部全体同仁的不懈努力下, 已于 1996 年 5 月正式出版。

《中国科学引文索引》收录了我国出版的重要科技期刊 315 种, 内容涉及数学、物理、化学、天文、地学、生物、医药卫生、农业科学、工业技术、环境科学等领域。在创刊号上, 《中国科学引文索引》报道了 315 种期刊在 1994 年发表的 32000 余篇文章和近 10 万条相关的中国引文。

《中国科学引文索引》由 4 部分组成: 引文索引、来源索引、机构索引(附国家重点实验室及开放实验室索引)和轮排主题索引。它除用于一般性文献检索外, 还可利用文献间的引用关系进行引文检索, 也可在一定程度上用于文献计量学和科学计量学研究, 为科研决策和管理部门提供客观的定量评价依据。

此外, 报道了 315 种期刊在 1991~1994 年发表的近 13 万篇文章和近 30 余万条相关的中国引文的《中国科学引文索引》(光盘版) 也将在近期推出。

《大气科学》已被《中国科学引文索引》收录。根据中国科学引文数据库 1994 年度统计数据, 在“被引频次最高的中国科技期刊 500 名排行榜”中, 《大气科学》排名第 18 位。