

大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法^{*}

II. 对比实验与应用研究

尉东胶 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 通过对比观测实验, 分析了宽谱方法与总辐射-直射比方法对大气气溶胶折射率虚部的反演结果。对比结果表明: 两种方法对虚部的反演结果分别为 0.012 ± 0.003 和 0.011 ± 0.004 。另外, 本文直接利用气象台站的辐射观测资料计算了北京 1992 年的大气气溶胶折射率虚部, 并分析了北京地区气溶胶的局地辐射气候效应, 发现北京气溶胶的辐射气候效应在冬季是倾向于加热的, 而其他季节则倾向于冷却。

关键词: 对比实验; 折射率虚部; 辐射气候效应

1 引言

尉东胶和邱金桓从理论上提出了一个大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法^[1]。为了在实验上作进一步的验证, 我们在北京市延庆县的康西草原进行了对比观测实验, 将宽谱方法反演的虚部结果与总辐射-直射比方法的反演结果作了对比。

考虑到我国许多气象台站具有长期的宽谱漫射和宽谱直射的常规观测历史, 这种反演虚部的宽谱方法在实际中是很有意义的。本文直接利用北京气象台站的宽谱辐射观测资料, 计算了该地 1992 年的大气气溶胶折射率虚部, 并对北京气溶胶的局地辐射气候效应作了简单的分析。

2 对比观测实验

用来对比的窄谱方法是根据 Herman 等人^[2]的漫射-直射比值方法稍加改变的总辐射-直射比方法, 该对比实验的设计与安排是为了能同时满足两种方法反演虚部的需要。

所用实验仪器包括: DFY3 型太阳直接辐射表、TBQ-2 型太阳总辐射表、DTF-1 型多功能太阳辐射计、L83 型多波段光度计。DFY3 型太阳直接辐射表波长响应范围为 $0.3 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 。TBQ-2 型总辐射表波长响应范围为 $0.3 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 。DTF-1 型多功能太阳辐射计视角范围为 1° , 8 个过滤片的中心波长分别为: 0.4、0.44、0.52、0.612、0.67、0.78、0.88 和 $1.03 \mu\text{m}$, 实验中用来测量对应于各个中心波长的直射。用一台微机来控

制仪器追踪太阳中心, 转换光片, 采样及随时存储数据。根据邱金桓^[3]的检定 $0.78\ \mu\text{m}$ 的辐射计常数的精度为 0.687% 。L83 型多波段光度计是一种半球辐射计, 实验中用来测量 $0.65\ \mu\text{m}$ 的向下半球总辐射。标定方法如下:

为了由地面测得的总辐射 F 得到大气上界该波长的总辐射 F_0 , 利用 Gauss-Seidel 迭代方法^[4], 从理论上计算 $0.65\ \mu\text{m}$ 处的地面总辐射 F 与该波长大气上界总辐射 F_0 的比值。计算中, 考虑水汽和臭氧的吸收。计算得到的比值结果列在表 1 中。

表 1 $0.65\ \mu\text{m}$ 的总辐射与该波长大气上界总辐射 F_0 比值

	$\tau_M(0.65\ \mu\text{m})=0.2$			$\tau_M(0.65\ \mu\text{m})=0.18$			$\tau_M(0.65\ \mu\text{m})=0.22$		
	$A=0.1$	$A=0.13$	$A=0.15$	$A=0.1$	$A=0.13$	$A=0.15$	$A=0.1$	$A=0.13$	$A=0.15$
$m=0.005$	0.8720	0.8723	0.8757	0.8747	0.8761	0.8783	0.8691	0.8707	0.8730
$m=0.01$	0.8653	0.8667	0.8688	0.8687	0.8700	0.8721	0.8618	0.8632	0.8654
$m=0.015$	0.8610	0.8620	0.8641	0.8637	0.8649	0.8669	0.8556	0.857	0.8591

标定观测期间, 测得 $0.65\ \mu\text{m}$ 的平均地表反射率 A 为 0.13 , $0.65\ \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度 $\tau_M(0.65\ \mu\text{m})=0.2$ 。大气气溶胶折射率虚部取为 $m=0.01$ 。则由表 1 可得地面测得的 $0.65\ \mu\text{m}$ 的总辐射与大气上界该波长的总辐射比值为 0.8667 , 再利用测得的地面总辐射可得到大气上界该波长的总辐射 F_0 。由此, 实现了对 L83 型多波段光度计的定标。当地表反射率从 0.13 变化到 0.1 或 0.15 , $\tau_M(0.65\ \mu\text{m})$ 从 0.2 附近变化 $\pm 10\%$, 虚部在 0.01 附近变化 ± 0.005 , 引起该比值的相对变化分别为 0.2% , 0.3% 和 0.6% 。因此, 利用这种方法对 L83 型多波段光度计进行定标, 估计精度不低于 1.5% 。

观测从太阳刚刚升起后不久开始, DTF-1 型多功能太阳辐射计由微机控制系统自动且连续采集数据的, 对各个中心波长的直接太阳辐射测量, 在太阳天顶角余弦较小时差不多 $1\sim 2\ \text{min}$ 观测一次, 在太阳天顶角余弦较大时约 $4\sim 5\ \text{min}$ 观测一次。

3 反演结果对比

用来对比的总辐射-直射比方法, 是对 Herman 等人^[2]提出的漫射-直射比方法稍加变化而来的。不同点在于采用的是总辐射与直射的比值。考虑到在天顶角余弦比较小的情况下, 漫射在总辐射中是主要的, 因此与漫射-直射比一样, 总辐射-直射比值必然对虚部很敏感; 而在天顶角余弦较大时, 直射在总辐射中是主要的, 故总辐射-直射比值对虚部不太敏感。因此, 当与这种方法作对比时, 宜采用较小的太阳天顶角余弦。

实验中, 波长取为 $0.65\ \mu\text{m}$, 该波长的总辐射 F 由 L83 型多波段光度计测出, 该波长的直射是根据比尔定律由理论上计算得到的。

图 1 比较了宽谱方法与总辐射-直射比方法的反演结果。反演结果表明: 宽谱方法反演得到的虚部在 0.007 到 0.018 之间变动, 而总辐射-直射比方法反演的虚部在 0.005 到 0.017 之间变动。对 22 个天顶角下的虚部反演结果进行平均, 得到宽谱方法和总辐射-直射比方法的平均值及标准差分别为 0.012 ± 0.003 和 0.011 ± 0.004 。

从图 1 可以看出: 尽管在某些天顶角下两种方法反演结果有一定的偏差, 在某一个太阳天顶角下两种方法的反演结果的差别可能还比较大, 例如, 在 $06:20$ 时刻, 宽谱方

法和总辐射-直射比方法反演的虚部结果分别为 0.018 和 0.005, 但总的来说, 宽谱方法的反演结果与总辐射-直射方法的反演结果符合得相当好。这样就在实验上证明了我们提出的宽谱方法具有较好的精度。

除了利用实验数据对两种反演虚部的方法作对比以外, 本文进一步讨论了在实际应用中, 对谱分布的粗略处理对虚部

反演结果的影响。在上述利用宽谱方法反演虚部时, 对每一个观测时刻, 都是采用实时的 Junge 谱分布参数代入进行计算的。这里采用 3 个固定的 Junge 谱分布参数, 即 $v^* = 2.5$, $v^* = 3.0$ 和 $v^* = 3.5$, 都对所有的观测时刻进行反演, 其他的输入参数与采用实时的 Junge 谱分布参数进行反演时相同。对固定值 $v^* = 2.5$, $v^* = 3.0$ 和 $v^* = 3.5$, 在 22 个太阳天顶角下对虚部反演的平均结果分别为 0.009 ± 0.002 , 0.011 ± 0.003 和 0.013 ± 0.003 。在利用宽谱方法反演虚部时, 采用实时的 Junge 谱分布参数反演与采用固定的 Junge 谱分布参数反演, 其结果差别很小; 而且采用 $v^* = 2.5$, 3.0 和 3.5 三个固定谱分布参数反演时的差别也很小。这种结果进一步证明了尉东胶和邱金桓^[1]在理论分析中得到的结论, 即: 利用该宽谱方法反演虚部时, 粒子谱分布的不确定性对虚部反演的结果影响较小。因此, 如果缺乏气溶胶粒子谱分布的信息, 可以采用某个固定的 Junge 谱分布参数, 例如, $v^* = 3.0$ 来反演, 一般不会对虚部反演结果有大的影响。

4 应用研究

考虑到我国许多气象台站具有长期宽谱太阳漫射和宽谱太阳直射常规观测历史, 这种反演虚部的宽谱方法在实际应用中是很有意义的。本文采用北京 1992 年晴天的宽谱辐射资料反演计算了该地区的大气气溶胶折射率虚部, 并利用反演结果分析了北京地区气溶胶的辐射气候效应。

计算时, $0.75 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度由邱金桓的方法^[3]从宽谱直射中得到; 利用杨景梅、邱金桓^[5]得到的大气整层水汽含量与地面水汽压经验关系, 由地面水汽压得到大气整层水汽含量; 由于气溶胶粒子谱分布对虚部反演结果影响小, 取 Junge 谱分布参数 $v^* = 3.0$ 进行计算; 臭氧含量取 1992 年月平均观测值; 地表反射率取为 0.15。

利用下面理论计算的方法得到每一个观测时刻的遮光环订正系数。

对于平面平行大气, 考虑水汽和臭氧吸收, 忽略其他气体的吸收作用, 于是通过求解辐射传输方程, 可求得光学厚度为 τ 、波长 λ 、天顶角余弦为 μ 的亮度 $I(\lambda, \tau, \mu)$ 。

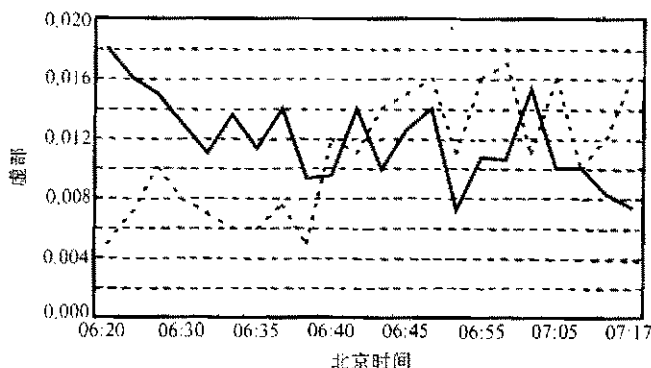


图1 宽谱方法(实线)与总辐射-直射比方法(虚线)的虚部反演结果对比

对波长 λ , 到达地面处向下的辐射通量为

$$D_{\lambda}(\lambda, \tau) = 2\pi \int_0^{-1} I(\lambda, \tau, \mu) \mu d\mu.$$

对波长积分, 得到光学厚度为 τ 时的宽谱漫射为

$$D(\tau) = \int_{0.3}^4 D_{\lambda}(\lambda, \tau) d\lambda.$$

对于波长 λ , 光学厚度为 τ 时, 被遮光环挡住的向下的辐射通量为

$$H_{\lambda}(\lambda, \tau) = \int_{\Omega} I(\lambda, \tau, \mu) \mu d\mu d\varphi,$$

式中, Ω 代表遮光环。计算时, 为了提高精度, 对太阳天顶角余弦 μ 进行进一步的插值, 将向下的太阳天顶角余弦 μ 从 60 个线性插值成为 240 个。对遮光环的积分采用微分方法, 沿着纬线方向将遮光环划分成对应于太阳天顶角余弦 μ 的小积分元, 根据球面几何计算每一个积分元对应的方位角 φ 。

计算波长范围内, 遮光环挡住的总的向下辐射通量为

$$H(\tau) = \int_{0.3}^4 H_{\lambda}(\lambda, \tau) d\lambda.$$

则散射辐射表实际观测到的宽谱漫射为

$$CT(\tau) = D(\tau) - H(\tau).$$

因此, 对于某一观测时刻, 当光学厚度为 τ 时, 遮光环订正系数为

$$C = \frac{1}{1 - H(\tau) / D(\tau)}.$$

利用上述方法对宽谱漫射做订正时, 用从北京气象站得到的宽谱漫射值先除以观测时采用的经验订正系数, 再乘以上述由理论计算得到的订正系数。经过转换之后得到观测时刻宽谱漫射的观测值。

考虑到用上述理论方法计算得到的遮光环订正系数与反演的虚部有关, 因此采用下面的步骤来反演虚部:

(1) 将气象台站的宽谱漫射数值除以当时采用的遮光环订正系数, 得到散射辐射表观测值 $D_{\text{环}}$; 根据邱金桓^[3]的方法, 从宽谱直射中得到 $0.75 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度, 然后取 Junge 谱分布参数 $v^* = 3.0$, 得到各个波长的气溶胶光学厚度;

(2) 假设一个虚部值 m , 求解辐射传输方程, 得到此时的遮光环订正系数 C , 则宽谱漫射为 $D_{\text{观测}} = C \times D_{\text{环}}$, 将此值作为对应于该虚部 m 的宽谱漫射真值;

(3) 求解辐射传输方程, 计算宽谱漫射 D ;

(4) 比较 D 与 $D_{\text{观测}}$, 若 $D > D_{\text{观测}}$ 则增大 m , 反之则减小 m ;

(5) 重复步骤 (2)、(3)、(4), 直到 $|D - D_{\text{观测}}| \leq \varepsilon$ (ε 为一小量, 本文中取为 $D_{\text{观测}}$ 的 0.1%) 停止计算, 此时的 m 值取为所反演的虚部值。

对于 1992 年北京气象站观测资料中的每一个晴天, 根据上述反演步骤得到北京

1992 年 91 个晴天, 观测时刻为 14 点的大气气溶胶折射率虚部。图 2 为反演结果, 图中横坐标 N 为日期编号, 取 1 月 1 日为 0, 1 月 2 日为 1、1 月 3 日为 2、……, 依此类推。

从图 2 可以看出北京地区 1992 年的气溶胶折射率虚部具有明显的季节变化趋势: 1 月、2 月和 12 月明显地偏大一些, 其他月份则相对小一些。为了进一步分析北京 1992 年虚部的季节变化趋势, 本文对每一个月的虚部反演解作了平均, 结果见表 2。

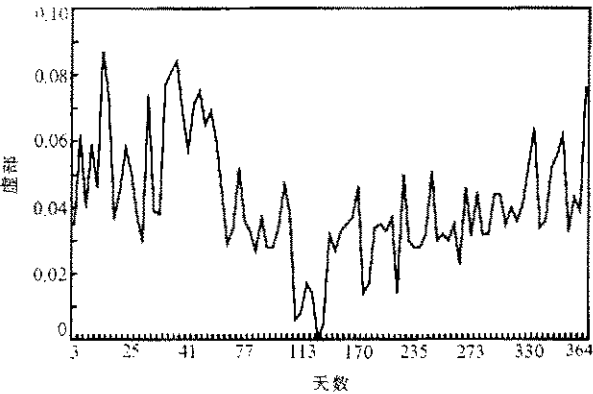


图 2 北京 1992 年虚部的反演结果

表 2 北京 1992 年虚部反演解的月平均值

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
虚部	0.053	0.064	0.031	0.027	0.013	0.030	0.031	0.029	0.034	0.032	0.040	0.050

从表 2 可以看出: 北京 1992 年 1 月、2 月和 12 月的气溶胶折射率虚部的月平均值分别为 0.053、0.065 和 0.050, 明显地比其他月份的虚部平均值大得多, 同时 11 月的虚部平均值也比其他月份大一些。其主要原因是: 冬季采暖燃烧了比其他月份更多的煤炭, 因而向大气中排放了比其他月份更多的含碳气溶胶, 而含碳气溶胶的虚部比其他气溶胶成分大得多。该结果也与邱金桓等人^[6]利用窄谱探测方法得到的北京地区的大气气溶胶折射率虚部结果符合较好。

在反演得到了北京 1992 年的大气气溶胶折射率虚部以后, 本文采用与 Yamamoto 和 Tanaka^[7]相同的方法, 简单分析了北京地区大气气溶胶的辐射气候效应。计算时, 波长范围取为 $0.3\sim 4.0\text{ }\mu\text{m}$; 取 Junge 谱分布参数 $\nu^*=3.0$; 地表反射率取为 0.15, 整层水汽含量和臭氧含量取 1992 年月平均观测值。对每一个月份, 取 15 日为该月份的计算日期。

图 3 是 1992 年各个月份气溶胶引起行星反照率的变化曲线。图中, 虚线表示浑浊大气 (包括分子和气溶胶作用) 的情况, 实线表示分子大气的情况。计算时采用的气溶胶光学厚度取每个月份所有晴天的平均值。从图 2 可以看出: 对于 1992 年 1 月、2 月和 12 月, 浑浊大气对应的行星反照率小于分子大气对应的行星反照率, 即气溶胶对地气系统的作用是倾向于加热的; 对其他月份, 浑浊大气对应的行星反照率大于分子大气对应的行星反照率, 即气溶胶对地气系统的作用是倾向于冷却的。

图 4 是 1992 年各个月份气溶胶引起的等效黑体温度的变化曲线。根据本文的估计, 对于 1992 年, 1 月、2 月和 12 月的气溶胶对地气系统分别有加热作用; 3 月到 11 月的气溶胶对地气系统有冷却作用。

根据对 1992 年的大气气溶胶虚部的反演结果, 1 月、2 月和 12 月的虚部分别为

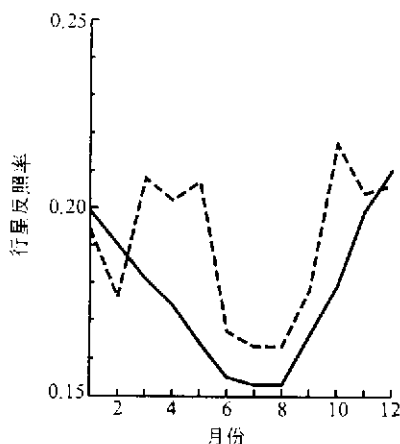


图3 气溶胶引起的行星反照率的变化
实线表示分子大气，虚线表示分子和氣溶胶

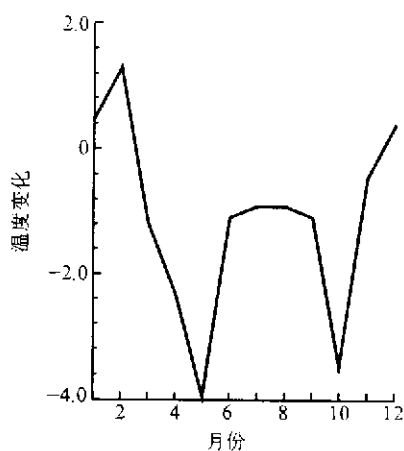


图4 气溶胶引起等效黑体温度的变化

0.053、0.064 和 0.05，均不小于 0.05；3 月到 11 月的虚部分别为 0.031、0.027、0.013、0.030、0.031、0.029、0.034、0.032 和 0.040，均小于 0.05。根据 Yamamoto 和 Tanaka^[7]对 Junge 谱分布下的分析，大气气溶胶虚部在 0.05 以上时，行星反照率随着气溶胶光学厚度的增加而减小，即气溶胶对地气系统的作用是倾向于加热的。从上面的分析可以看出，本文在 Junge 谱分布下气溶胶辐射效应的分析结果与 Yamamoto 和 Tanaka^[7]的结果比较吻合。对虚部不小于 0.05 的 1 月、2 月和 12 月，气溶胶对地气系统的作用基本上是加热的；虚部小于 0.05 的其他月份，气溶胶对地气系统的作用倾向于冷却。

5 结论

(1) 对比实验结果表明：宽谱方法和总辐射—直射比方法对虚部的反演结果分别为 0.012 ± 0.003 和 0.011 ± 0.004 ，两种方法对虚部的反演结果符合得很好，因而在实验上证明宽谱方法对虚部的反演具有较高的精度；

(2) 采用宽谱方法反演虚部时，利用实时 Junge 谱分布参数和利用三个固定的 Junge 谱分布参数($v^* = 2.5$ 、3.0 和 3.5)对虚部的反演结果差别很小，从而在实验上证明了气溶胶粒子谱分布误差对虚部反演解的影响较小。因此实用中可以采用某一个固定的 Junge 谱分布参数进行反演，一般不会对虚部反演结果造成大的误差；

(3) 北京 1992 年 1 月、2 月和 12 月的气溶胶折射率虚部的月平均值分别为 0.053、0.064 和 0.050，明显地比其他月份的虚部平均值大得多，同时 11 月的虚部平均值也比其他月份大一些；

(4) 本文的分析表明：北京地区冬季气溶胶对地气系统的作用是倾向于加热的；而其他季节，气溶胶对地气系统的作用是倾向于冷却的。

参 考 文 献

- 1 尉东胶, 邱金桓, 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 I. 理论, 大气科学, 1998, 22, 677~685.
- 2 Herman, B. M., S. R. Browning and J. J. De Luisi, Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of atmospheric dust by remote sensing, the Diffuse-Direct radiation method, *J. Atmos. Sci.*, 1975, 32, 918~925.
- 3 Qiu Jinhuan, A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation, *J. Atmos. Sci.*, 1998, 55, 744~757.
- 4 Herman, B. M. and S. R. Browning, A numerical solution to the equation of radiative transfer, *J. Atmos. Sci.*, 1965, 22, 559~566.
- 5 杨景梅, 邱金桓, 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式, 大气科学, 1996, 20, 620~626.
- 6 Qiu Jinhuan, Sun Jinghui, Xia Qilin, Zhang Jingding and Zhou Xiuji, Simultaneous determination of the aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—Part II, application, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, 3(3), 341~348.
- 7 Yamamoto Giichi and M. Tanaka, Increase of global albedo duoto air pollution, *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29, 1405~1412.

Wide-Band Method to Retrieve the Imaginary Part of Complex Refractive Index of Atmospheric Aerosol Part II: Comparative Measurement and Application

Wei Dongjiao and Qiu Jinhuan

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

Abstract This paper analyzes the inversion results made in comparative measurements by the wide-band method and the total to direct radiation ratio method. It is showed that the average imaginary parts by the two methods are 0.012 ± 0.003 and 0.011 ± 0.004 , respectively. Furthermore, this paper retrieved the imaginary part of aerosol refractive index in Beijing during 1992 from radiation data at the meteorological observatory and analyzed the logical radiation-climate effect of Beijing's aerosol. It is found that Beijing's aerosol has a warming trends during winter.

Key words: comparative measurement; imaginary part of refractive index; radiation-climate effect