

从宽带太阳直接辐射小时或日曝辐量 反演气溶胶光学厚度研究*

邱金桓 杨理权

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

P4 A

摘要 从宽带的太阳直接辐射1天或1小时累计量(曝辐量)气象观测资料反演气溶胶光学厚度的一个有效方法是很有用的。作者把太阳曝辐量与“等效”的瞬时太阳直接辐射关联起来,建立了一个与曝辐量“等效”的瞬时太阳直接辐射的模式;应用该模式和一个“等效”波长模式,发展了一个从太阳直接曝辐量反演气溶胶光学厚度的方法。作者还从试验上比较分析了由某时刻的宽带太阳直接辐射、每小时或1天的太阳直接辐射曝辐量反演得到的气溶胶光学厚度以及由太阳光度计探测的气溶胶光学厚度。试验结果表明,由日太阳直接辐射曝辐量反演得到的气溶胶光学厚度可理解为辐射加权的日平均光学厚度。

关键词: 曝辐量;“等效”瞬时辐射;气溶胶;光学厚度;参数化

1 引言

大气气溶胶光学厚度对环境污染、气候变化、卫星光学遥感的大气订正等研究,都是重要的。应用太阳光度计探测窄带的直接太阳辐射,并从中反演得到气溶胶光学厚度,是一经典而又可靠的方法^[1]。但这类探测由于需要较昂贵的仪器因而在世界上还不太普及。因此,许多学者多年来努力探索从太阳直射表探测的宽带太阳直接辐射反演气溶胶光学厚度的方法。这类方法一个优点是探测仪器比较廉价,另一重要的好处是世界上有大量气象台站长期进行宽带太阳辐射的常规观测(最早的观测可追溯到19世纪80年代^[2])。从宽带的太阳直接辐射提取大气浑浊度和气溶胶光学厚度的应用研究已有很长的历史。最著名、最广泛的应用是 Linke 浑浊度因子^[3,4]。Linke 浑浊度因子表征了大气对太阳辐射的总消光特征,不仅与气溶胶光学特性有关,还与分子散射、水汽含量、太阳天顶角等参数密切相关,不能作为气溶胶含量的定量指标。因此,一些学者努力寻求从宽带的太阳直接辐射确定气溶胶光学厚度的方法。Unsworth 和 Monteith 提出了反演宽带气溶胶光学厚度(BAOD)的方法^[5],1998年 Gueymard 进一步发展了应用 BAOD 确定 $1\ \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度(即 Angström 浑浊度系数)的方法^[6]。由于 BAOD 也与分子散射、水汽含量、太阳天顶角等参数密切相关,其应用也有一定的局限。另一类方法是从宽带太阳直接辐射反演波长有关的气溶胶光学厚度。1981年 Blanchet 提出了“等效”波长(即与 BAOD 等值的气溶胶光学厚度相对应的波长)的概念,指出了该波长约为 $0.7\ \mu\text{m}$ ^[7]。近年来,邱金桓发现:在小于 70° 的太阳天顶角范围

2000-09-11 收到, 2001-04-31 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999045700 和国家自然科学基金资助项目 49675254 共同资助

内, 宽带太阳直接辐射可以表示为 4 个因子的积, 其中一个因子为 $0.7 \mu\text{m}$ 或 $0.75 \mu\text{m}$ 波长的气溶胶的透过率, 其他的因子与气溶胶的光学特性无关或弱相关; 依据该特性, 他提出了反演 $0.7 \mu\text{m}$ 或 $0.75 \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度的宽带消光法^[8-10]。这一宽带消光法已被用于研究中国的气溶胶光学厚度的区域分布和变化特征^[11-13]。邱金桓的最近研究表明^[14]: 当太阳天顶角大于 70° 时, 上面谈及的“等效”波长对气溶胶的谱分布是很敏感的, 可远大于 $0.7 \mu\text{m}$ 。因此, 他进一步建立了“等效”波长与气溶胶谱分布、水汽含量和太阳天顶角的经验关系模式^[14]。这些反演气溶胶光学厚度的模式都要求输入对应某一时刻(瞬时)的太阳天顶角, 因而要求输入瞬时的宽带太阳直接辐射信息。但是, 气象台站的太阳直接辐射观测记录资料通常是 1 小时或 1 天的曝辐量, 一个应用曝辐量反演气溶胶光学厚度的有效方法是很有用的。本文的主要目的就在于研究从太阳直接辐射曝辐量信息反演气溶胶光学厚度的方法。

2 方法

首先介绍一个参数化的“等效”波长模式, 接着建立一个与太阳直接辐射曝辐量“等效”的瞬时太阳直接辐射模式, 最后论述应用这些模式反演气溶胶谱光学厚度的方法。这里所谓的“瞬时”是指某一时刻。

2.1 “等效”波长参数化模式

在无前向散射光的条件下, 地面上由太阳直接表检测的太阳直接辐射可表示为

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_a(\lambda, \theta_0) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) \exp[-\tau_a(\lambda) m_a(\theta_0)] T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda, \quad (1)$$

上式中, $S_0(\lambda)$ 是大气上界 λ 波长的太阳辐照度, θ_0 是太阳天顶角, $m_a(\theta_0)$ 是气溶胶的光学大气质量, $\tau_a(\lambda)$ 是 λ 波长气溶胶光学厚度, λ_1 和 λ_2 是太阳直接表光谱响应的上限和下限, T_a 是气溶胶光谱透过率, T_m 是分子(散射加吸收)透过率。太阳天顶角较大时, 散射光的贡献必须加以考虑, 在后面的试验研究中, 本文采用 Gueymard 模式^[6]进行扣除散射光订正。

由宽带的太阳直接辐射 S 可确定宽带的气溶胶光学厚度(τ_{BAOD})如下^[14]:

$$\tau_{\text{BAOD}} = -1 / m_a \ln(t_{a+m} / t_m), \quad (2)$$

$$t_{a+m} = \frac{S}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

$$t_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \theta_0) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

(2) ~ (4) 式中, t_{a+m} 是宽带大气(气溶胶加分子)透过率, t_m 是宽带的分子透过率。要从宽带的太阳直接辐射信息反演宽带的气溶胶光学厚度, 必须事先确定宽带的分子透过率 t_m 。为了简化计算, 作者最近应用最小二乘法, 发展了一个宽带分子透过率

参数化模式^[14]。本文采用这一模式用于后面的反演算法。

所谓的“等效”波长 λ_E 与 τ_{BAOD} 应满足如下关系式^[14]。

$$\tau_{\text{BAOD}} = \tau_a(\lambda_E). \quad (5)$$

基于 λ_E 的特性, 作者在早先的研究中发展了一个参数化的“等效”波长模式, 其表达式为^[14]

$$\lambda_E = \lambda_0 + a(m_a - 1) + b(m_a - 1)^{1.78} + f_{\text{size}}. \quad (6)$$

$$\lambda_0 = 0.787 - 0.02u + 0.00232u^2 - \frac{0.0854\alpha - 0.0103\alpha^2}{1 + 0.048u} + \frac{0.074(\alpha - 0.161\alpha^2)}{1 + 0.05u} \tau_{\text{BAOD}} + \frac{0.00425(\alpha + \alpha^2)}{1 + 0.05u} \tau_{\text{BAOD}}^2, \quad (7)$$

$$a = 0.0433(1 - 0.036u) \left[0.456\tau_{\text{BAOD}}^{0.1} + \frac{2(1 + \alpha)(1 + 4.6\alpha)\alpha^2}{1 + 2\alpha^2 + 9.2\alpha^3} \tau_{\text{BAOD}} \right], \quad (8)$$

$$b = 0.0074\alpha^2 \tau_{\text{BAOD}}^3, \quad (9)$$

$$f_{\text{size}} = \frac{0.19(\alpha_2 - \alpha_1)^3}{1 + (\alpha_2 - \alpha_1)^2} + \frac{0.402(\alpha_2 - \alpha_1)}{1 + (\alpha_2 - \alpha_1)^2 + u + \tau_{\text{BAOD}}}, \quad (10)$$

$$m_a = \left[\frac{\mu_0 + 0.031141\theta_0^{0.1}}{(92.471 - \theta_0)^{1.3814}} \right]^{-1}, \quad (11)$$

上式中, m_a 是气溶胶光学空气质量, u 为水汽含量 (cm), $\mu_0 = \cos(\theta_0)$, α_1 和 α_2 分别是 $\lambda \leq \lambda_M = 0.732 \mu\text{m}$ 和 $\lambda \geq \lambda_M$ 波长范围内的 Angström 波长指数, 所有的波长物理量均采用 μm 单位。这里 λ_M 是大气上界 50% 太阳辐射能量所对应的波长。在 Junge 气溶胶谱分布的情形下, $\alpha_1 = \alpha_2$, $f_{\text{size}} = 0$ 。在非 Junge 气溶胶情形下, 如果 $\alpha_1 < \alpha_2$, $f_{\text{size}} > 0$, λ_E 具有较长的波长。

如参考文献[14]所示, 对通常的大气气溶胶条件和 0° 至 85° 的太阳天顶角变化, “等效”波长可在 $0.62 \mu\text{m}$ 至 $1.58 \mu\text{m}$ 范围内变化, 而由这个参数化模式计算的“等效”波长的误差一般在 $0.05 \mu\text{m}$ 以内。

2.2 “等效”的瞬时太阳直接辐射模式

气象站的太阳直接辐射观测资料记录通常是 1 小时或 1 天的曝辐量。为了应用这些曝辐量资料, 本文提出了一个与曝辐量“等效”的瞬时太阳直接辐射模式, 用于反演气溶胶的光学厚度。

如果从 t_0 至 t_{60} (对应的太阳天顶角余弦从 μ_0 至 μ_{60}) 的 1 小时观测时间内大气是稳定的, 那么太阳直接辐射一定是时间的连续函数, 也必然存在某一时刻 t (对应的太阳天顶角余弦记为 μ_t), 它所对应的太阳直接辐射 $S(t)$ 满足:

$$S(t)\Delta t = S(\mu_t)\Delta t = B = \sum_{i=0}^N S(t_i)\Delta t_i, \quad (12)$$

$$\Delta t = \sum_{i=0}^N \Delta t_i, \quad (13)$$

上式中, Δt_i 是第 i 个辐射观测采样的时间间隔, N 为采样数, B 为 1 小时太阳直接

辐射曝辐量。在我国现在的气象台站, 采样时间间隔通常为 1 min。\$S(t)\$ 可视为与曝辐量 \$B\$ “等效”的瞬时太阳直接辐射。在辐射研究中, 通常采用太阳天顶角余弦变量 \$\mu\$ 代替时间 \$t\$。根据大量的 LOWTRAN 7^[15] 计算数据, 本文得到了关于该 \$\mu_t\$ 的一个经验表达式如下:

$$\mu_t = \mu_{30} - 0.074(\mu_{60} - \mu_{30}) \exp(-\mu_{30}), \quad (14)$$

(14) 式中, \$\mu_{00}\$ 为观测开始时刻的 \$\mu\$ 值, \$\mu_{30}\$ 为第 30 分钟的 \$\mu\$ 值, \$\mu_{60}\$ 为第 60 分钟的 \$\mu\$ 值。

数值模拟检验表明: 在 Junge 谱分布条件下, 对于 0 至 2 的 Angström 的波长指数, 0 至 1 的 Angström 浑浊度系数 (\$1 \mu\text{m}\$ 波长的光学厚度) 以及 \$0^\circ\$ 至 \$85^\circ\$ 的太阳天顶角变化, 应用 (14) 式计算的“等效”瞬时太阳直接辐射与 LOWTRAN 7 计算结果的偏差在 0.3% 以内。

为了应用整天的太阳直接辐射曝辐量观测资料反演气溶胶的光学厚度, 本文还发展了如下的另一个“等效”瞬时太阳直接辐射模式:

$$\mu_t = 0.571\mu_{\max} \exp(-0.094\mu_{\max}), \quad (15)$$

(15) 式中, \$\mu_{\max}\$ 为当天最大的太阳天顶角余弦, \$\mu_t\$ 的物理意义是: 与 \$\mu_t\$ 相等的天顶角余弦所对应的太阳直接辐射与日照时间的乘积刚好等于 1 天的太阳曝辐量。应用 LOWTRAN 7 的数值模拟检验表明: 在气溶胶光学厚度不变的条件下, 对于 0 至 2 的 Angström 的波长指数, 0 至 1 的 Angström 浑浊度系数, 应用 (15) 式计算的“等效”瞬时太阳直接辐射与 LOWTRAN 7 计算结果的偏差在 1.2% 以内。在真实的大气中, 气溶胶光学厚度的日变化往往是大的, 正如后面的试验研究结果所表明的, 在这种情形下由日曝辐量反演得到的气溶胶光学厚度可理解为辐射加权的日平均气溶胶光学厚度。

2.3 应用“等效”波长模式反演气溶胶光学厚度的方法

应用 (2) ~ (4) 式, 从太阳直接辐射 \$S\$ 可求得宽带气溶胶光学厚度 \$\tau_{\text{BAOD}}\$, 再应用 (6) ~ (11) 式, 可求得等效波长 \$\lambda_E\$。于是, 如果气溶胶相对谱分布 \$n(r)\$ 和折射率 \$m\$ 已知, 气溶胶粒子为球形, 应用 Mie 散射计算, \$\lambda\$ 波长的气溶胶光学厚度可确定如下:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{BAOD}} \frac{\sigma_a[\lambda, n(r), m]}{\sigma_a[\lambda_E, n(r), m]}, \quad (16)$$

这里 \$\sigma_a\$ 是气溶胶消光系数。

如果气溶胶光学厚度与波长之间存在乘方的依赖关系, (16) 式可简化为:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{BAOD}} \left(\frac{\lambda_E}{\lambda} \right)^\alpha, \quad (17)$$

这里 \$\alpha\$ 是 Angström 波长指数。于是, 只要令 \$\lambda\$ 分别等于 \$0.7 \mu\text{m}\$, \$0.75 \mu\text{m}\$ 和 \$1 \mu\text{m}\$, 这些波长的气溶胶光学厚度可根据 (17) 加以确定。

对于太阳直接辐射曝辐量信息, 可应用 (14) 或 (15) 式, 求得“等效”瞬时太阳直接辐射, 再求得气溶胶光学厚度。

3 试验研究

应用本文发展的方法与模式的试验研究包括如下三方面的内容: (1) 由每小时的太阳直接辐射累计量反演得到的气溶胶光学厚度与由太阳光度计探测的光学厚度的比较; (2) 由 11:00~12:00 的太阳直接辐射累计量反演得到的北京气溶胶光学厚度与由 12:00 时刻的太阳直接辐射反演的光学厚度的比较; (3) 由每小时的太阳直接辐射累计量反演得到的气溶胶光学厚度的日平均值与由 1 天的太阳直接辐射累计量反演的气溶胶光学厚度的比较。在由宽带的太阳直接辐射资料反演气溶胶光学厚度时, 气溶胶谱分布均假设为波长指数 α 等于 1 的 Junge 谱, 臭氧含量取自北京臭氧观测结果的月平均值, 大气柱水汽含量由杨景梅和邱金桓发展的经验模式^[16]加以计算。

图 1 至图 3 把从北京的太阳直接辐射资料反演得到的气溶胶光学厚度与由太阳光度计探测的光学厚度作了比较。太阳直接辐射资料为北京气象观测站探测的 1 小时的曝辐量。太阳光度计的观测地点为北京朝阳区中国科学院大气物理研究所办公楼楼顶。太阳光度计有 8 个滤光片, 中心波长分别为 0.40、0.44、0.52、0.61、0.67、0.78、0.88 和 1.03 μm , 除 1.03 μm 波长外, 半宽度均小于 4 nm。图中的光学厚度均指 0.78 μm 波长的值。

图 1 为 1 月 8 日的观测结果。在这一天, 气溶胶光学厚度日变化很大, 范围在 0.336 到 0.774 之间, 光度计和太阳直射表的观测结果有较好的一致, 由光度计探测的光学厚度的一个小时平均值与由每小时的太阳直接辐射累计量反演得到的气溶胶光学厚度的偏差在 15% 以内。图 2 为 4 月 3 日的观测结果。光学厚度在这一天的上午倾向于缓慢地变小, 在下午明显地变大。在这一变化过程中, 两种方法的探测结果具有很好的吻合。图 3 为 4 月 8 日的观测结果。在这一天, 北京气溶胶污染很严重, 其光学厚度大于 0.8, 在 13:30 左右, 光学厚度升至 1.6 以上, 两种探测结果的偏差在 16% 以内。从图 2 和图 3 看, 由太阳直接辐射表探测的气溶胶光学厚度通常大于由太阳光度计探测的结果。原因可能是两方面的。一个原因是两个仪器的观测地点不同, 太阳直接辐射表

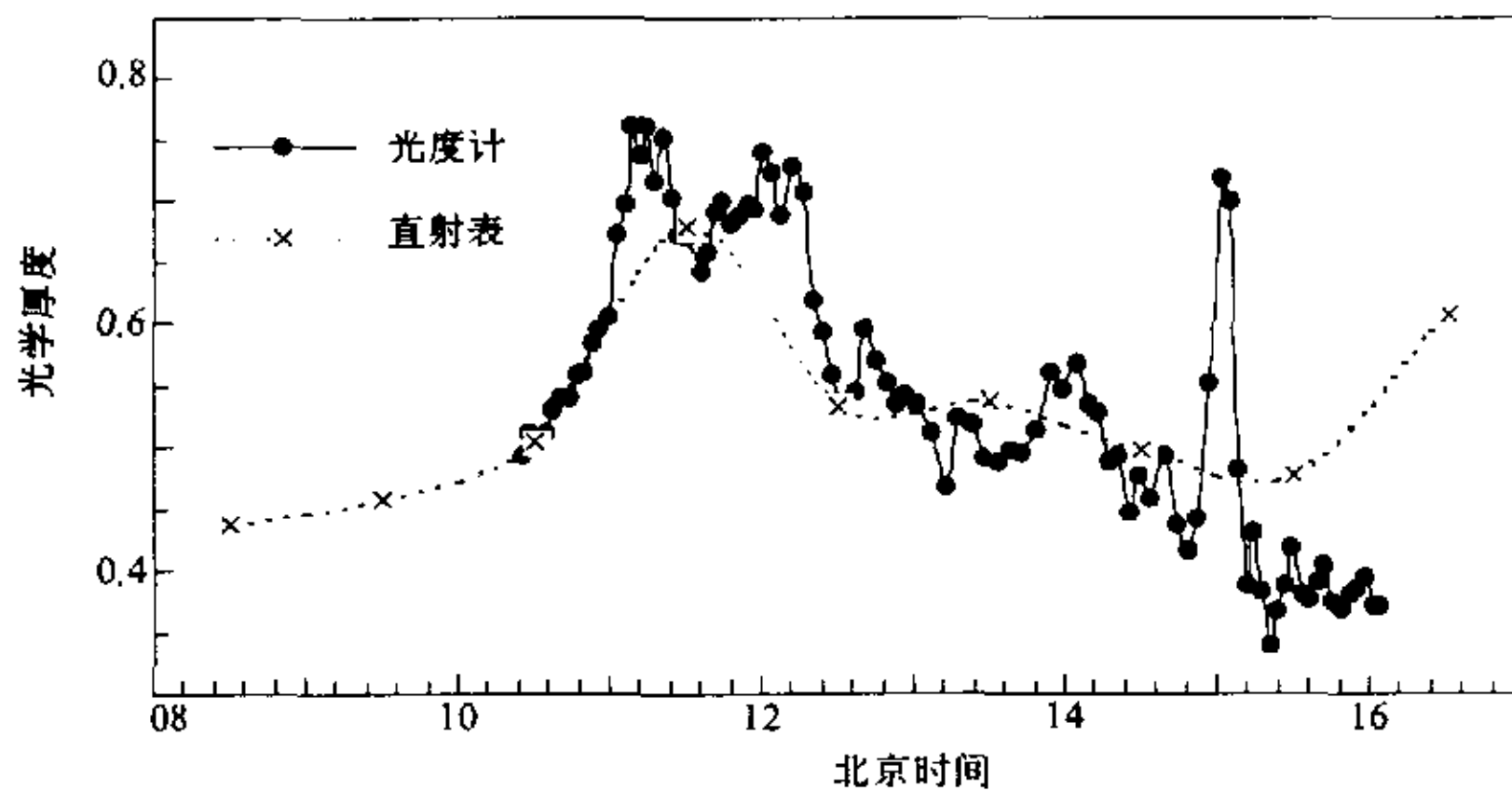


图 1 由太阳直射表和光度计探测的 1995 年 1 月 8 日气溶胶光学厚度比较

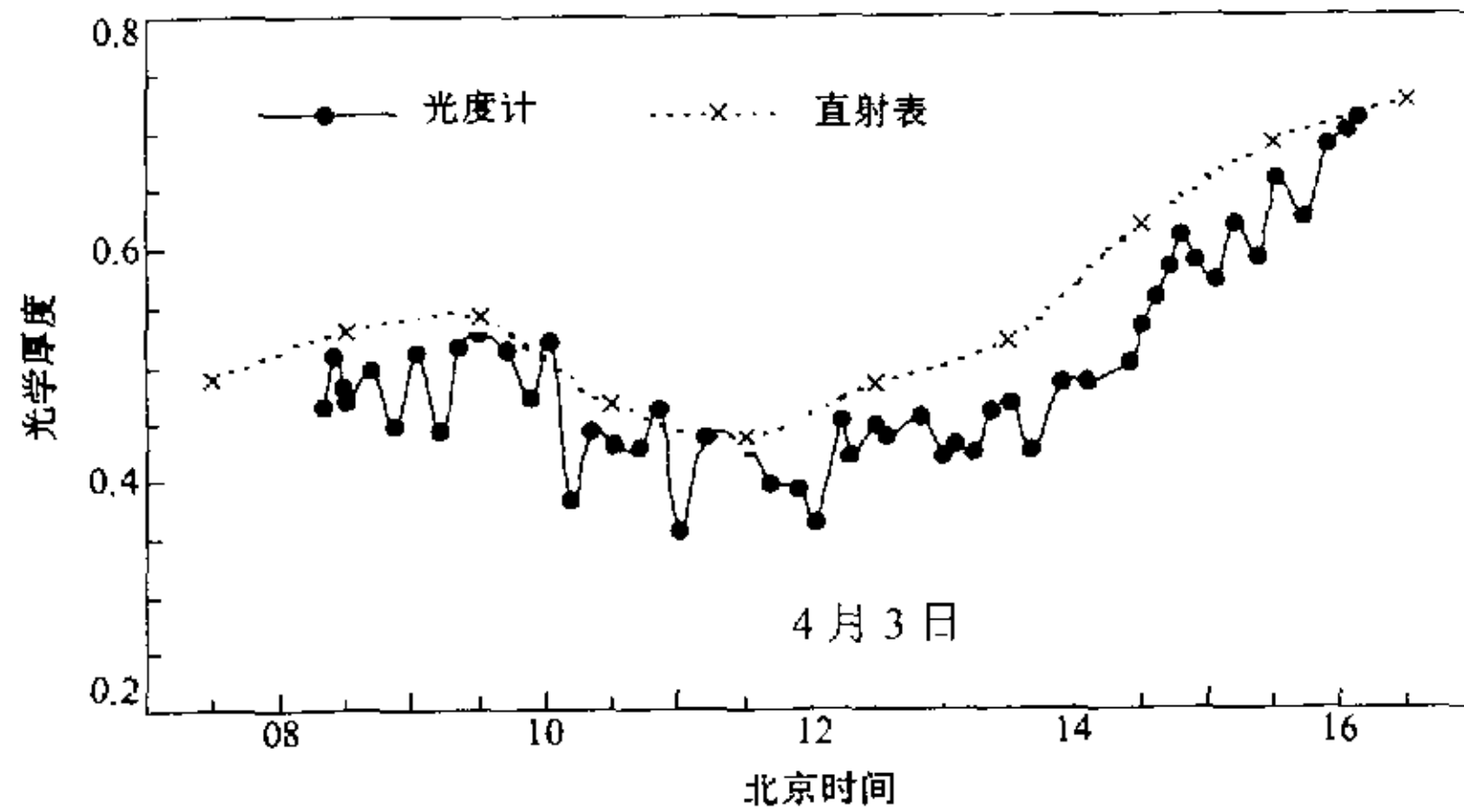


图 2 由太阳直射表和光度计探测的 1995 年 4 月 3 日气溶胶光学厚度比较

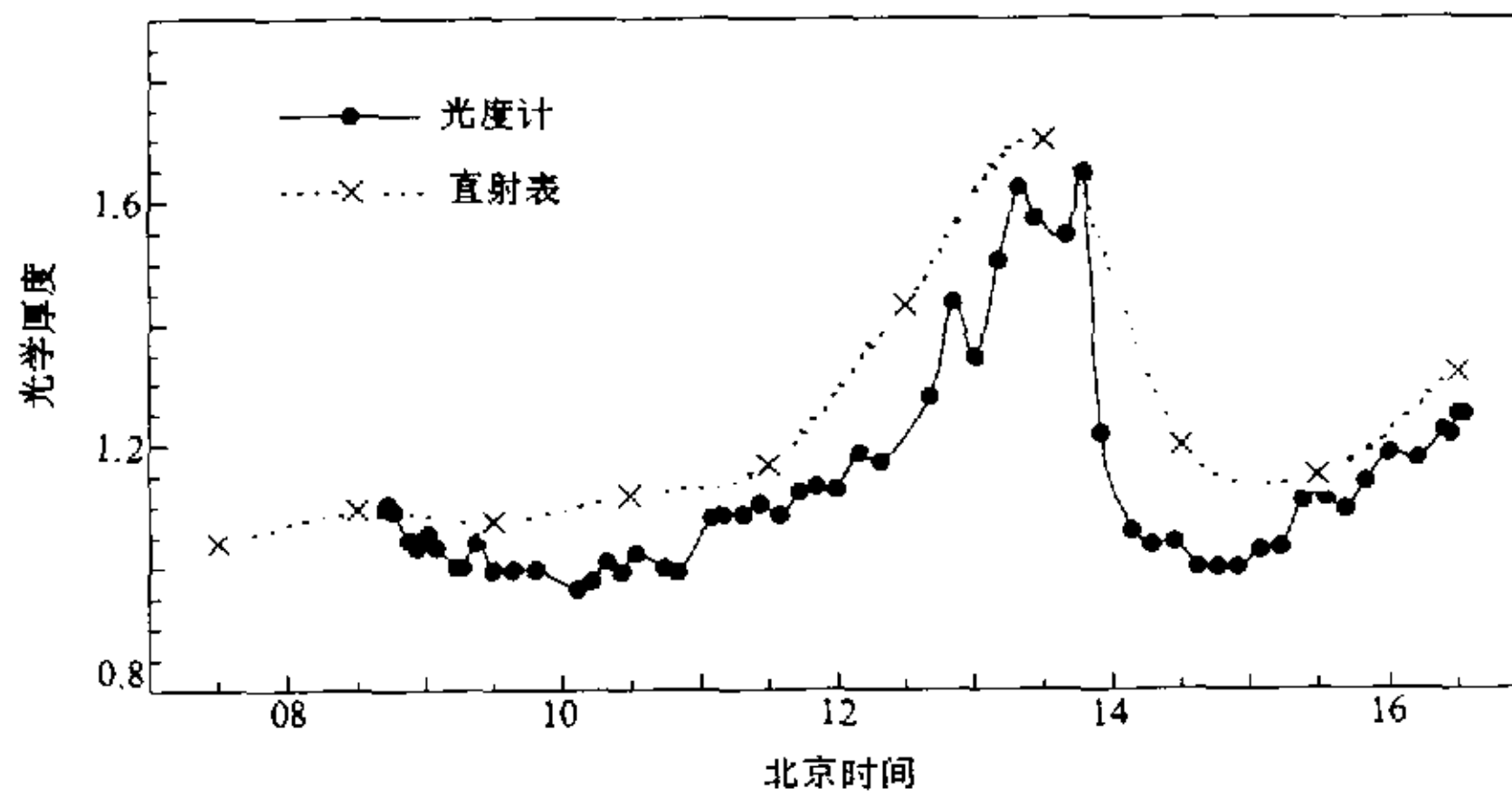


图 3 由太阳直射表和光度计探测的 1995 年 4 月 4 日气溶胶光学厚度比较

观测地点在北京海淀区观象台，太阳光度计安装在朝阳区中国科学院大气物理研究所 10 层办公楼的楼顶上，高度相差 30 多米。另一原因可能是由仪器标定误差所致。

图 4 比较了由北京气象观测站于 1994 年探测的 11:00~12:00 太阳直接辐射累积量和 12:00 时刻太阳直接辐射反演得到的 $0.75 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度。所有的资料均为无云天气条件下的探测结果。如图所示，由 11:00~12:00 太阳直接辐射累积量和 12:00 时刻太阳直接辐射反演得到的气溶胶光学厚度有很好的吻合，最大的偏差为 18.7%，平均的光学厚度分别为 0.552 和 0.528，相差仅为 4.5%。在 4~6 月 3 个月，11:00~12:00 期间平均的光学厚度通常大于 12:00 时刻的光学厚度。

在大气气溶胶光学特性和水汽含量不变的条件下，太阳天顶角越小，太阳的直接辐射越强，太阳直接辐射 1 天累计量更多地来自小太阳天顶角的贡献，也更反映小太阳天顶角时的气溶胶变化。因此，本文定义如下两种日平均的气溶胶光学厚度：

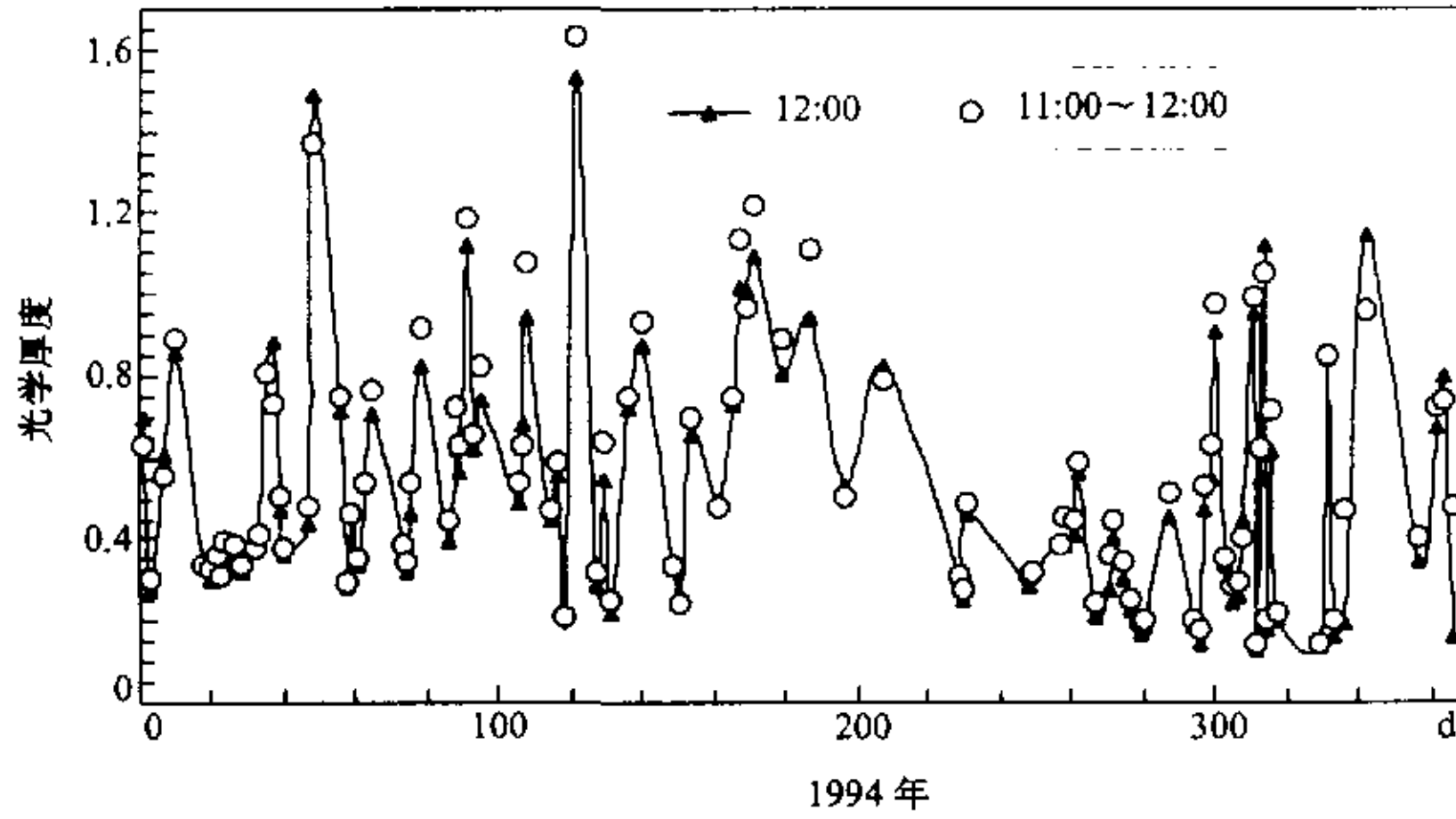


图4 由11:00~12:00太阳直接辐射累积量和12:00时刻太阳直接辐射反演得到的气溶胶光学厚度之比较

$$\tau_{a,1} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} s(t)\tau_a(t)dt}{\int_{t_0}^{t_1} s(t)dt}, \tag{18}$$

$$\tau_{a,2} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tau_a(t)dt, \tag{19}$$

上面两式中， t_0 和 t_1 分别为1天中日照的初始和终止时刻（ $t_1 - t_0$ 为日照时间）， $S(t)$ 为 t 时刻的地面上太阳的直接辐射， $\tau_a(t)$ 为 t 时刻的气溶胶光学厚度， $\tau_{a,1}$ 为辐射加权的日平均气溶胶光学厚度。如果光学厚度不存在日变化， $\tau_{a,1}$ 和 $\tau_{a,2}$ 应是相等的。

下面根据图5至图7，比较由太阳直接辐射1天累计量反演得到的 $1\mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度（ $\tau_{a,0}$ ）与由直接辐射的逐小时累计量反演的同波长气溶胶光学厚度的日平均值（ $\tau_{a,1}$ 和 $\tau_{a,2}$ ）。图5和图6分别为1995年1月和4月晴天（无云或透光云）条件下的探测结果。在计算 $\tau_{a,1}$ 和 $\tau_{a,2}$ 时，本文采用从08:00（对1月）或07:00（对4月）至17:00的逐小时太阳直接辐射累计量的探测值。

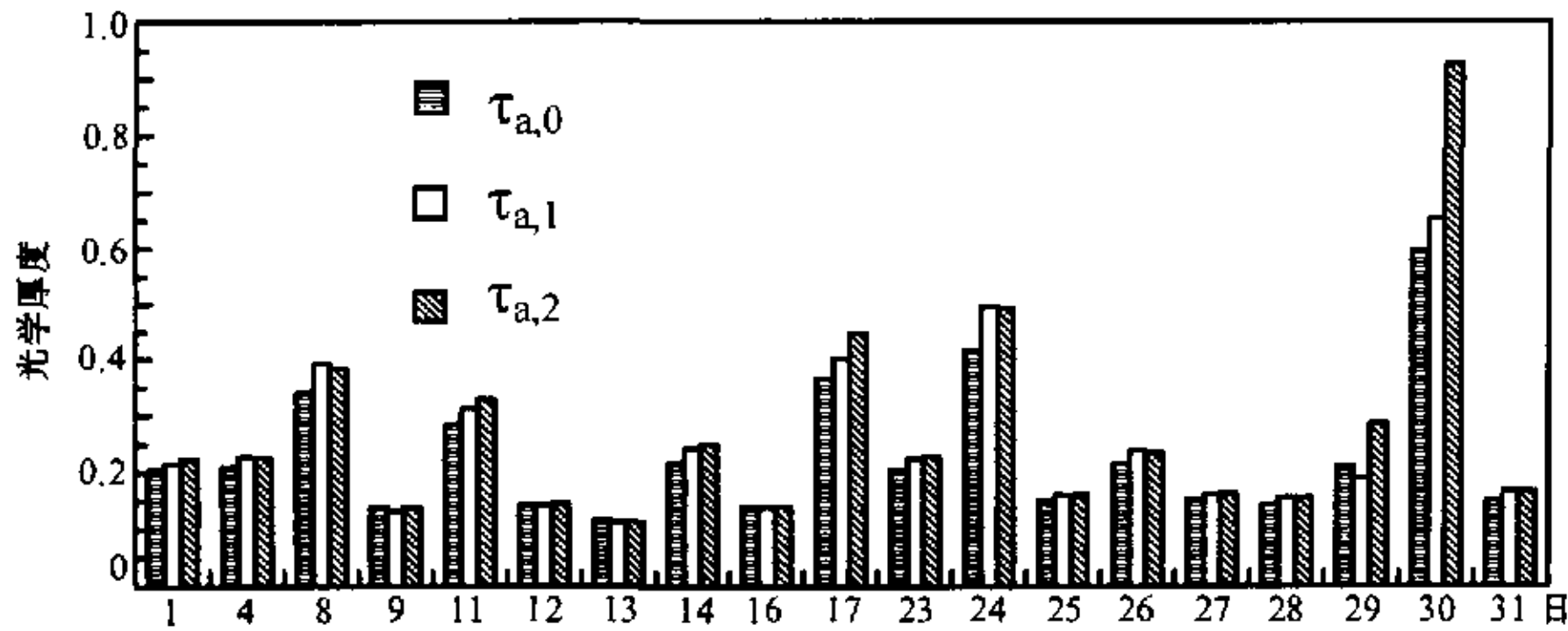


图5 1995年1月由太阳直接辐射1天累计量反演得到的气溶胶光学厚度与由直接辐射的逐小时累计量反演的气溶胶光学厚度均值的比较

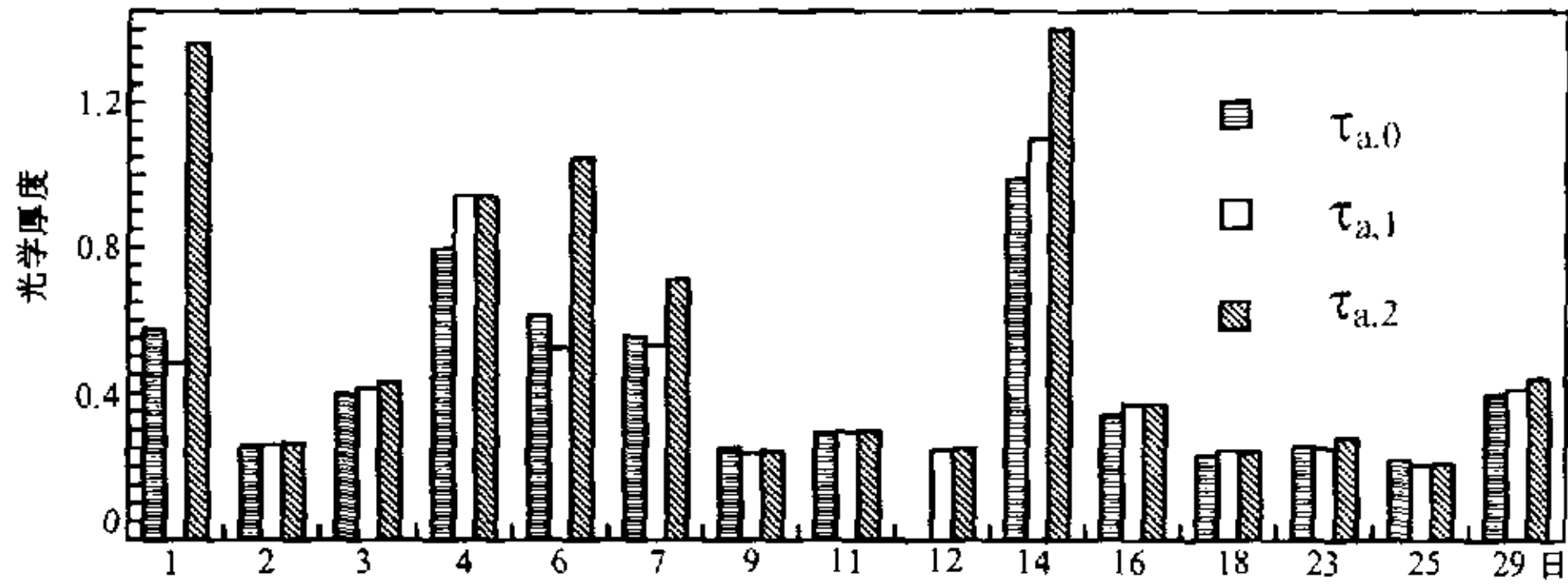


图6 1995年4月由太阳直接辐射1天累计量反演得到的气溶胶光学厚度与由直接辐射的逐小时累计量反演的气溶胶光学厚度均值的比较

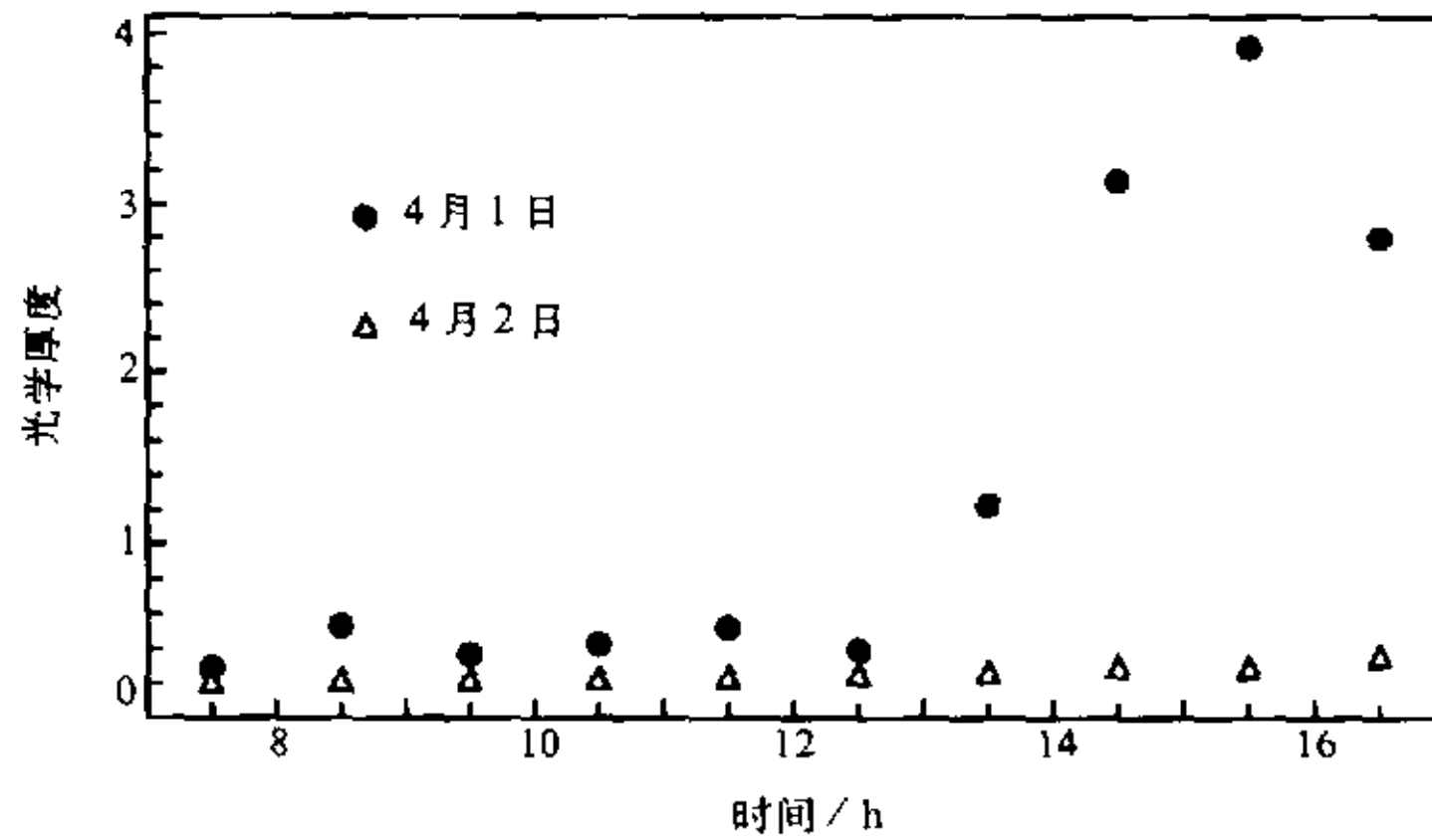


图7 由太阳直接辐射的小时累计量反演得到的气溶胶光学厚度的日变化

如图5和图6所示,由逐小时直接辐射累计量反演得到的辐射加权日平均气溶胶光学厚度($\tau_{a,1}$)与由太阳直接辐射1天累计量反演得到的气溶胶光学厚度有相当好的吻合,最大的偏差为17.2%,就月平均值而言,1月份分别为0.248和0.231,相差6.9%,在4月份,分别为0.428和0.432,相差仅为0.3%。就大多数样本而言, $\tau_{a,2}$ 与 $\tau_{a,0}$ 的偏差也是小的,但如4月1日等情形,两者的偏差是很大的,可大于0.7,这可从图7所示的气溶胶光学厚度的日变化特征得到解释。如图7所示,在4月2日,气溶胶光学厚度的日变化较小, $\tau_{a,1}$ 和 $\tau_{a,2}$ 两者都与 $\tau_{a,0}$ 有很好的吻合。在4月1日,12:30以后,气溶胶光学厚度迅速增大,太阳的直接辐射必然明显变小,日曝辐量主要来自上午的贡献,导致 $\tau_{a,0}$ 更多地反映上午的气溶胶光学厚度,大大小于非辐射加权平均的气溶胶光学厚度值($\tau_{a,2}$)。在气溶胶日变化较大的条件下, $\tau_{a,1}$ 也与 $\tau_{a,0}$ 有好的吻合,这是由于它是辐射加权意义上的日平均光学厚度。有些天的光学厚度较大,甚至高达1.4,估计有云存在。有云存在时,很难从1天的辐射总量中区别云和气溶胶的辐射。云光学厚度越大,太阳直接辐射越小,对1天的辐射累计量的贡献越小。因此,云天和晴天相

间出现时, 由日曝辐量反演得到的 Mie 光学厚度更主要反映小光学厚度 (特别是气溶胶光学厚度) 的信息, 可理解为辐射加权的日平均 Mie 光学厚度。

从上面所述的试验研究结果可以看出, 应用太阳直接辐射累计量反演气溶胶光学厚度的本文模式是合适的, 由日曝辐量反演得到的光学厚度可理解为辐射加权的日平均光学厚度。

4 结论

气象台站的太阳直接辐射观测记录资料通常是 1 小时或 1 天的辐射累积量 (曝辐量)。为了应用这些资料以提取气溶胶光学厚度信息, 本文引入与太阳曝辐量相“等效”的瞬时太阳直接辐射概念, 并基于 LOWTRAN 7 数值模拟资料, 建立起“等效”瞬时太阳直接辐射的参数化模式; 提出了一个应用该模式和一个参数化的“等效”波长模式从太阳曝辐量反演气溶胶光学厚度的方法。与太阳直接辐射曝辐量相“等效”的瞬时太阳直接辐射参数化模式是在气溶胶光学厚度不随时间变化的条件下建立的。在真实的大气中, 气溶胶光学厚度的日变化往往是大的, 正如对比试验研究结果所表明的, 在这种情形下由日曝辐量反演得到的气溶胶光学厚度可理解为辐射加权的日平均气溶胶光学厚度。气溶胶光学厚度越小, 太阳的直接辐射越强, 因而对太阳直接辐射日曝辐量的贡献越大, 该曝辐量更多地反映气溶胶光学厚度较小时的状态, 这就是为什么本文定义的辐射加权日平均气溶胶光学厚度小于日平均气溶胶光学厚度的缘故。

本文从试验上比较分析了由瞬时宽带太阳直接辐射、小时或日直接辐射曝辐量反演得到的气溶胶光学厚度以及由光度计探测的气溶胶光学厚度。试验结果表明了本文发展的宽带辐射模式和从直接辐射曝辐量反演气溶胶光学厚度方法的适用性和有效性。

太阳直射表的视场角较大, 散射光的贡献必须加以考虑, 特别当太阳天顶角和气溶胶光学厚度较大时。本文采用 Gueymard 模式进行散射光订正, 它的有效性有待进一步研究。此外, 太阳天顶角较大时, 应用宽带消光法得到的气溶胶光学厚度对谱分布是比较敏感的^[14], 作者已经从理论上提出了一个同时反演气溶胶光学厚度和谱分布的方法^[14], 它的有效性有待试验检验。

参 考 文 献

- 1 Holben, B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Eagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and Smirnov, A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 1998, **66**, 1~16.
- 2 Stothers, R. B., Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: pyrheliometric period, 1881~1960, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 3901~3920.
- 3 Linke, F., Transmissions-koeffizient und trübungsfaktor, *Beitr. Phys. Fr. Atmos.*, 1922, **10**, 91~103.
- 4 WMO, Meteorological Aspects of Utilization of Solar Radiation as An Energy Source, Geneva: Secretariat of WMO, 1981, Techn. Note No. 172, WMO-No.557, 122.
- 5 Unsworth, M. H. and J. L. Monteith, Aerosol and solar radiation in Britain, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**, 778~797.
- 6 Gueymard, C., Turbidity determination from broadband irradiance measurements: A detailed multicoefficient

- approach, *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**, 414~435.
- 7 Blanchet J. P., Application of the Chandrasekhar mean to aerosol optical parameters, *Atmos. Ocean*, 1982, **20**, 189~206.
 - 8 Qiu Jinhuan, A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation, *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**, 734~758.
 - 9 邱金桓, 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I. 理论, *大气科学*, 1995, **19**, 385~394.
 - 10 邱金桓, 大气气溶胶光学厚度的宽带消光遥感方法及其应用, *遥感学报*, 1997, **1**, 15~23.
 - 11 邱金桓、杨景梅、潘继东, 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 II. 实验研究, *大气科学*, 1995, **19**, 586~596.
 - 12 Qiu Jinhuan and Yang Liqun, Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980~1994, *Atmos. Environ.*, 1999, **34**, 601~607.
 - 13 周秀骥、李维亮、罗云峰, 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟, *大气科学*, 1998, **22**, 418~427.
 - 14 Qiu Jinhuan, Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties, *Tellus*, 2001, **53B**, 72~82.
 - 15 Kneizys, F. X., L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby and S. A. Clough, User's Guide to LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory AFGL-TR-88-0177, 1988, 146pp.
 - 16 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.

A Study of Retrieving Aerosol Optical Depth from Day- or Hour-Exposed Broadband Solar Direct Radiation

Qiu Jinhuan and Yang Liqun

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

Abstract An available method to retrieve aerosol optical depth from day- or hour-exposed broadband solar direct radiation detected at meteorological observatory is of a great significance. In this paper, an "effective" instantaneous solar direct radiation, corresponding with the exposure radiation, is refined and then parameterized; and using the parameterization model and an "effective" wavelength model, a method to retrieve aerosol optical depth from the exposure radiation is proposed. Furthermore, aerosol optical depths retrieved from three kinds of radiation data, the instantaneous broadband solar direct radiation, the day- or hour-exposed broadband solar direct radiation and the sunphotometer measurement are comparatively analyzed. The results show that the aerosol optical depth from the day-exposed broadband solar direct radiation can be regarded as the day-averaged value of radiation-weighted aerosol optical depth.

Key words: day-exposed radiation; "effective" instantaneous radiation; aerosol; optical depth; parameterization